

SİZCE NASIL? *

Bu yaygın kullanılan aygıtların üçü de bilgi depolamak için manyetizmayı kullanır. Kaset bir saatten fazla müziği depolayabilir, disket yüzlerce sayfalık bilginin eşdeğerini tutabilir ve videotexte saatler alan televizyon programı kaydedilebilir. Bu aygıtlar nasıl çalışır? (George Semple)



b ö l ü m

30

Manyetik Alanın Kaynakları

Bölüm İçeriği

- | | |
|---|---|
| 30.1 Biot-Savart Yasası | 30.6 Manyetizmada Gauss Yasası |
| 30.2 İki Paralel İletken Arasındaki Manyetik Kuvvet | 30.7 Yerdeğiştirme Akımı ve Ampère Yasasının Genel Biçimi |
| 30.3 Ampère Yasası | 30.8 (Seçmeli) Madde İçinde Manyetizma |
| 30.4 Bir Solenoidin Manyetik Alanı | 30.9 (Seçmeli) Yerin Manyetik Alanı |
| 30.5 Manyetik Akı | |

Onceki bölümde manyetik alanda hareket eden yüklü bir parçacığa etkiyen manyetik kuvvetlerle ilgili problemleri inceledik. Manyetik etkileşimin anlatımını tamamlamak için bu bölümde, manyetik alanın kaynağı, yani, hareketli yükler ya da elektrik akımları ele alınacaktır. Konuya, küçük bir akım elemanının uzayın bir noktasında oluşturduğu manyetik alanı hesaplayabilmek için Biot ve Savart yasasının nasıl kullanıldığını göstererek başlayacağız. Sonra, bu yöntem ve üst-üste gelme ilkesini kullanarak çeşitli akım dağılımlarının oluşturduğu toplam manyetik alanı hesaplayacağız. Daha sonra, akım-taşıyan iki iletken arasındaki kuvvetin nasıl bulunacağını göstereceğiz. Bu, bizi Amperin tanımına götürür. Ayrıca Ampère yasasını da tanımlayacağız. Bu yasa kararlı akımlar taşıyan oldukça simetrik şekillerin manyetik alanlarını hesaplamak için çok kullanışlıdır.

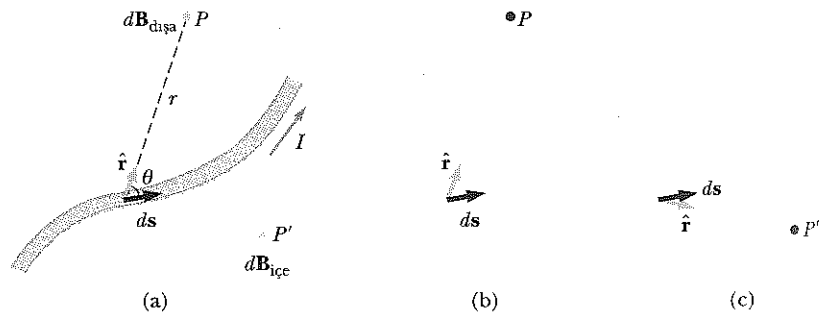
Bu bölüm, aynı zamanda, manyetik maddelerde oluşan karmaşık süreçlerle de ilgilenmektedir. Maddedeki tüm manyetik olaylar, atomik manyetik dipol momentlerle açıklanabilir. Bu atomik manyetik momentler, hem elektronların yörüngesel hareketlerinden, hem de *spin* denen "iç yapısal" özelliğinden kaynaklanır.

30.1 BIOT-SAVART YASASI

Oersted'in 1819'da akım-taşıyan bir iletkenin bir pusula iğnesini sapırdığını keşfinden kısa bir süre sonra, Jean Baptiste Biot (1774-1862) ve Felix Savart (1791-1841) bir elektrik akımının yakınındaki bir mıknatısa uyguladığı kuvvetle ilgili nicel deneyler yaptılar. Biot ve Savart deneysel sonuçlardan yola çıkarak uzayın bir noktasındaki manyetik alanı, bu alanı oluşturan akım cinsinden veren matematiksel bir ifade buldular. İfadede, kararlı bir I akımı taşıyan bir telin bir ds uzunluk elemanının P noktasında oluşturduğu $d\mathbf{B}$ manyetik alanı aşağıdaki deneysel gözlemlerine dayanır (Şekil 30.1):

Bir elektrik akımının oluşturduğu manyetik alanın özellikleri.

- $d\mathbf{B}$ vektörü, hem ds (akım yönündedir) ye ve hem de ds den P ye doğru yönelen $\hat{\mathbf{r}}$ birim vektörüne diktir.
- $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü r^2 ile ters orantılıdır. Burada r , ds nin P ye uzaklığıdır.
- $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü akımla ve ds uzunluk elemanının büyüklüğü, yani ds ile orantılıdır.
- $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü $\sin \theta$ ile orantılıdır. Burada θ , ds ve $\hat{\mathbf{r}}$ vektörleri arasındaki açıdır.



Şekil 30.1 (a) Bir ds uzunluk elemanından geçen I akımının P noktasında oluşturduğu $d\mathbf{B}$ manyetik alanı Biot-Savart yasasıyla verilir. P deki manyetik alanın yönü sayfa düzleminin dışına ve P' deki ise içe doğrudur. (b) $\hat{\mathbf{r}}$, P ye doğru baktığında $ds \times \hat{\mathbf{r}}$ vektörel çarpımının yönü sayfa düzleminin dışına doğru olur. $\hat{\mathbf{r}}$, P' ye yönelirse $ds \times \hat{\mathbf{r}}$ sayfa düzleminin içine doğru olur.

Bu gözlemler bu gün, **Biot-Savart** yasası olarak bilinen aşağıdaki matematiksel bağıntıyla özetlenebilir:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{r}}{r^2} \quad (30.1)$$

Biot-Savart Yasası

Burada μ_0 , **serbest uzayın geçirgenliği** denen bir sabittir:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A} \quad (30.2)$$

Boş uzayın geçirgenliği

Eşitlik 30.1 deki dB alanının, iletkenin yalnız küçük bir ds uzunluk elemanının, akımın oluşturduğu alan olduğuna dikkat etmek son derece önemlidir. Sonlu büyüklükteki bir akımın, bir noktada oluşturduğu **B toplam** manyetik alanını bulmak için, akımı oluşturan tüm $I ds$ akım elemanlarından doğan katkıları toplamamız gerekir. Yani, **B**'yi Eşitlik 30.1 in integralini alarak bulmalıyız:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{ds \times \hat{r}}{r^2} \quad (30.3)$$

Burada integral akım dağılımının tamamı üzerinden alınır. Bu ifade özel bir dikkatle kullanılmalıdır, çünkü integralin içinde vektörel bir nicelik bulunmaktadır. Örnek 30.1 de böyle integralli bir durumunu göreceğiz.

Biot-Savart yasası, bir akım-taşıyan tel için geliştirilmiş olmasına rağmen, bir televizyon setindeki elektron demeti gibi uzayda akan yüklerden oluşan bir akım için de geçerlidir. Bu durumda ds , yükün aktığı uzayın küçük bir parçasının uzunluk elemanıdır.

Manyetizmanın Biot-Savart yasası ile elektrostatiğin Coulomb yasası arasında ilginç benzerlikler vardır. $I ds$ akım elemanı bir manyetik alan oluşturur buna karşılık bir q nokta yükü elektrik alan oluşturur. Ayrıca, nokta yükten kaynaklanan elektrik alanı gibi, manyetik alanın büyüklüğü de akım elemanından uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değişir. Ancak, iki alanın yönleri oldukça farklıdır. Nokta yükün oluşturduğu elektrik alanı yükten çıkan doğrular boyuncadır (radyal). Fakat, bir akım elemanının oluşturduğu manyetik alan, Eşitlik 30.1 deki vektörel çarpım gereği hem ds akım elemanına ve hem de $\hat{r}$ birim vektörüne diktir. Bu yüzden, iletken kağıt düzleminde bulunuyorsa, Şekil 30.1 de olduğu gibi, dB , P noktasında kağıt düzleminin dışı ve P' 'de içe doğru yönelmektedir.

Elektrik ve manyetik alanlar arasındaki bir başka farklılık alanın kaynağı ile ilgilidir. Elektrik alanı, yalıtılmış bir elektrik yükü tarafından oluşturulur. Biot-Savart yasası yalıtılmış bir akım elemanının bir noktada oluşturduğu manyetik alanı verir, fakat böyle bir yalıtılmış akım elemanı, bir yalıtılmış yükün bulunabildiği şekilde bulunamaz. Bir akım elemanı, sürekli bir akım dağılımının bir parçası olmak *zorundadır*. Çünkü yüklerin akması için devremiz tam olmalıdır. Bu nedenle Biot-Savart yasası, bir manyetik alanı hesaplarken yalnız ilk adımdır. Bundan sonra akım dağılımı üzerinden integral almak gerekir.

Aşağıdaki Örneklerde **hesaplanan manyetik alanın akım-taşıyan bir iletkenin oluşturduğu alan** olduğuna dikkat etmemiz önemlidir. Bunun, iletkenin yakınına konan, bir çubuk mıknatıs gibi diğer kaynakların iletken civarında oluşturduğu ek manyetik alanlarla karıştırılmaması gerekir.

ÖRNEK 30.1 İnce Doğrusal Bir İletkeni Çevreleyen Manyetik Alan

Şekil 30.2 de olduğu gibi x eksenini boyunca yerleştirilen ve sabit bir I akımı taşıyan ince doğrusal bir tel veriliyor. Bu akımın P noktasında oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

Çözüm Biot-Savart yasası gereği, alanın büyüklüğünün teldeki akımla doğru orantılı olmasını ve telden P noktasına olan a uzaklığı arttıkça azalmasını bekleriz. İşe, tel üzerinde, P noktasından r uzaklıkta bir ds uzunluk elemanı olarak başlarız. Bu elemandaki akımın P noktasında oluşturduğu manyetik alanın yönü, sayfa düzleminden dışa doğrudur. Çünkü $ds \times \hat{r}$ dışa doğrudur. Gerçekte, akım elemanlarının hepsi sayfa düzleminin içinde oldukları için P noktasında oluşturdukları alanlar sayfa düzleminden dışa doğrudur. Böylece, P noktasındaki toplam manyetik alanın yönü kağıt düzleminden dışa doğrudur ve geriye manyetik alanın büyüklüğünü hesaplamak kalır.

Başlangıcı O 'da ve P yi pozitif y eksenini üzerinde alarak, k kağıt düzleminden dışa doğru olan bir birim vektör olmak koşuluyla,

$$ds \times \hat{r} = k |ds \times \hat{r}| = k(dx \sin \theta)$$

olduğunu Bölüm 3'ten biliriz. Burada, $|ds \times \hat{r}|$, $ds \times \hat{r}$ nin büyüklüğünü temsil eder. $\hat{r}$ bir birim vektör olduğundan, vektörel çarpımın birimi ds nin biriminin aynı, yani uzundur. İfade Eşitlik 30.1 de yerine konursa

$$dB = (dB) k = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dx \sin \theta}{r^2} k$$

elde edilir. Tüm akım elemanlarının manyetik alanları k yönünde olduklarından, bir akım elemanından kaynaklanan alanın büyüklüğüne, yani,

$$(1) \quad dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dx \sin \theta}{r^2}$$

bağıntısına bakalım. Bu ifadenin integralini almak için, θ , x ve r değişkenlerini birbirine bağlamalıyız. Yaklaşımlardan biri x ve r 'yi θ cinsinden ifade etmektir. Şekil 30.2a'daki geometriden

$$(2) \quad r = \frac{a}{\sin \theta} = a \csc \theta$$

bulunur. Şekil 30.2a'daki dik üçgenden $\tan \theta = a/(-x)$ olduğundan, (ds , x in negatif olduğu yerde seçildiği için negatif işaretli gerekli oldu),

$$x = -a \cot \theta$$

elde edilir. Bu ifadenin türevi alınarak,

$$(3) \quad dx = a \csc^2 \theta d\theta$$

(2) ve (3), (1) de yerlerine konulursa,

$$(4) \quad dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a \csc^2 \theta \sin \theta d\theta}{a^2 \csc^2 \theta} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin \theta d\theta$$

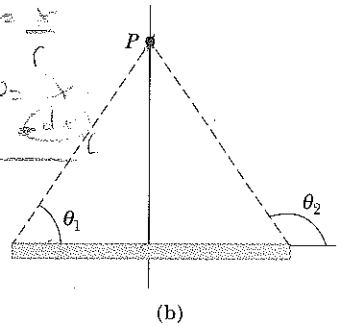
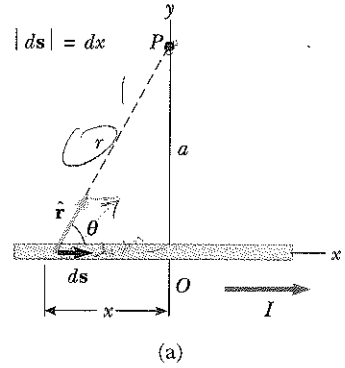
olur. Böylece, ifadeyi yalnız θ değişkenini içeren bir biçime indirgedik. Şimdi, Şekil 30.2b de tanımlandığı gibi θ_1 den θ_2 ye kadar olan açıları gören tüm elemanlar üzerinden (4)'ün integralini alarak P deki toplam alanı elde edebiliriz: Bu işlem

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (30.4)$$

sonucuna götürür. Geometriyi ve dolayısı ile θ_1 ve θ_2 açılarını bilirsek, bu sonucu, her hangi bir doğrusal telin manyetik alanını bulmak amacıyla kullanabiliriz. Özel olarak bir sonsuz uzunlukta doğru tel alalım. Bu durumda, Şekil 30.2b'den görülebileceği gibi $x = -\infty$ dan $x = +\infty$ a kadar olan uzunluk elemanları için $\theta_1 = 0$ ve $\theta_2 = \pi$ olur. $(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = (\cos 0 - \cos \pi) = 2$ olduğundan Eşitlik 30.6,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (30.5)$$

biçimine indirgenir.



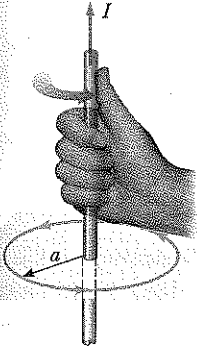
Şekil 30.2 (a) I akımı taşıyan ince doğrusal bir tel. Her bir ds elemanının P de oluşturduğu alan kağıt düzleminden dışa doğrudur ve bu nedenle net manyetik alan da kağıt düzleminden dışa doğrudur. (b) θ_1 ve θ_2 bu geometri için sınırlayıcı açılarıdır. Tel sonsuz uzunlukta olduğunda $\theta_1 = 0$ ve $\theta_2 = 180^\circ$ olur.

Eşitlik 30.4 ve Eşitlik 30.5 in her ikisinin de beklenildiği gibi manyetik alanın büyüklüğünün akımla doğru orantılı ve telden uzaklık arttıkça azaldığını göstermektedir. Eşitlik 30.5 in bir uzun yüklü doğru telden kaynaklanan elektrik alanının büyüklüğünü veren ifadeyle aynı matematiksel biçime sahip olduğuna dikkat ediniz (Eşitlik 24.7 ye bakınız).

Alıştırma 5A akım taşıyan bir sonsuz uzunlukta doğrusal telin, kendisinden 4 cm uzaklıkta oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü hesaplayınız.

Cevap $2,5 \times 10^{-5} \text{ T}$.

Örnek 30.1 in sonucu önemli, çünkü uzun, doğrusal bir tel biçimindeki akımla çok sık karşılaşılır. Şekil 30.3 uzun, doğru akım-taşıyan telin etrafında oluşturduğu manyetik alanın onu nasıl sardığını gösteren üç-boyutlu bir gösterimdir. Telin simetrisi gereği manyetik alan çizgileri, teline aynı eksenli çemberler olup teline dik olan düzlemlerde bulunurlar. B nin büyüklüğü yarıçapı a olan herhangi bir çember üzerindeki her noktada aynıdır ve Eşitlik 30.5 ile verilir. B nin yönünü bulmak için kolay bir kural, başparmak akımın yönünü gösterecek biçimde sağ-el ile teli kavramaktır. Diğer dört parmak manyetik alanın yönünü gösterir.



Şekil 30.3 Akım taşıyan uzun ve doğrusal bir telin oluşturduğu manyetik alanın yönünü belirlemeye yarayan sağ-el kuralı. Manyetik alan çizgilerinin telin etrafında çemberler oluşturduklarına dikkat ediniz.

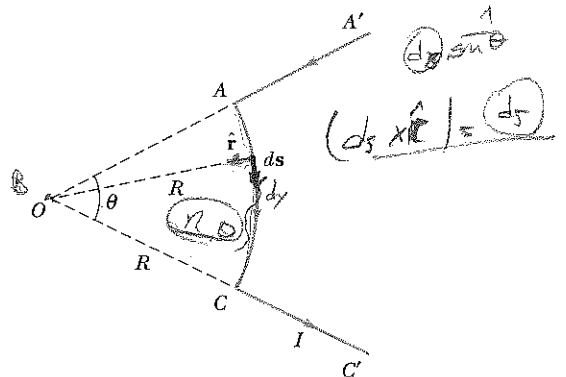
ÖRNEK 30.2 Kavisli Bir Tel Parçasından Kaynaklanan Manyetik Alan

Şekil 30.4 de gösterilen akım-taşıyan tel parçası için O noktasındaki manyetik alanı hesaplayınız. Tel, iki doğru parçası ve bir θ açısını gören R yarıçaplı çembersel bir yaydan oluşmuş. Tel üzerindeki ok-uçları akımın yönünü gösteriyor.

Çözüm AA' ve CC' doğru parçalarındaki akımların O da oluşturdukları manyetik alan sıfırdır. Çünkü bu yollar boyunca ds $\hat{r}$ ye paraleldir; bu demektir ki $ds \times \hat{r} = 0$. AC yolu boyunca her ds uzunluk elmanı, O dan aynı R uzaklıktadır ve herbirindeki akım O da kağıt düzleminin içine doğru yönelmiş bir dB alan elemanı kadar katkıda bulunur. Ayrıca, AC üzerindeki her noktada ds $\hat{r}$ ye diktir, bu nedenle $|ds \times \hat{r}| = ds$ dir. Eşitlik 30.1 i ve bu bilgiyi kullanarak, ds uzunluklu bir elemandaki akımdan kaynaklanan O daki alanın büyüklüğünü bulabiliriz:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{R^2}$$

$$B = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{R^2}$$



Şekil 30.4 Kavisli AC parçasındaki akımın O da oluşturduğu manyetik alan sayfanın içine doğrudur. Doğrusal parçalardaki akımların O daki alana katkıları sıfırdır.

İşte R sabit oldukları için, bu ifadenin integralini AC kavisli yolu boyunca kolayca alabiliriz:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \oint ds = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \cdot s = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \theta \quad (30.6)$$

Burada θ radyan cinsinden ölçmek kaydıyla $s = R\theta$ gerçeğini kullandık. $\mathbf{B}$ nin yönü O da sayfanın içine doğrudur,

çünkü her bir uzunluk elemanı için $ds \times \hat{\mathbf{r}}$ sayfanın içine doğru yönelmiştir.

Alıştırma Yarıçapı R olan bir çembersel tel ilmek I akımı taşımaktadır. Merkezindeki manyetik alanın büyüklüğü nedir?

Cevap $\mu_0 I / 2R$

ÖRNEK 30.3 Çembersel Bir Akım İlmeğinin Eksenindeki Manyetik Alan

Şekil 30.5 de görüldüğü gibi, kararlı bir I akımı taşıyan ve yz düzleminde bulunan R yarıçaplı çembersel bir tel ilmek veriliyor. Bu ilmeğin, ekseninde merkezinden bir x uzaklıkta bulunan bir P noktasındaki manyetik alanı hesaplayınız.

Çözüm Bu durumda, çember üzerindeki her ds uzunluk elemanının, bulunduğu yerde $\hat{\mathbf{r}}$ ye dik olduklarına dikkat ediniz. Bu nedenle, herhangi bir eleman için $|ds \times \hat{\mathbf{r}}| = (ds) (1) \sin 90 = ds$ dir. Ayrıca, ilmeğin çevresindeki uzunluk elemanlarının hepsi P den aynı r uzaklıktadır. Burada $r^2 = x^2 + R^2$ dir. Öyleyse herhangi bir ds elemanında akımdan kaynaklanan $d\mathbf{B}$ nin büyüklüğü

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{|ds \times \hat{\mathbf{r}}|}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + R^2)}$$

ile verilir. Şekil 30.5 de gösterildiği gibi, $d\mathbf{B}$ alanının yönü, $\hat{\mathbf{r}}$ ve ds nin oluşturduğu düzleme diktir. $d\mathbf{B}$ vektörü, x eksenini boyunca bir dB_x ve x eksenine dik bir dB_y bileşenine ayrılabilir. Tüm ilmek için x 'e dik bileşenler toplandığı zaman toplamalarının sıfır olduğu görülür. Bir başka deyişle, simetriden ötürü, ilmeğin herhangi bir tarafındaki bir eleman, çapsal olarak tam karşısındaki bir başka elemanın oluşturduğu $d\mathbf{B}$ alanının dik bileşenini dengeleyerek yok edebilen bir dik bileşen oluşturacaktır. Bu nedenle, P deki bileşke alan x eksenini boyunca olmalı ve $dB_x = dB \cos \theta$ bileşenlerinin integralini alarak bulabiliriz. Yani, $\mathbf{B} = B_x \hat{\mathbf{i}}$ olup, burada B_x

$$B_x = \oint dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{ds \cos \theta}{x^2 + R^2}$$

biçiminde verilir ve integrali ilmeğin tamamı üzerinden almamız. θ , x ve R ilmeğin tüm elemanları için sabittirler ve $\cos \theta = R / (x^2 + R^2)^{1/2}$ olduğundan

$$B_x = \frac{\mu_0 I R}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} \oint ds = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (30.7)$$

buluruz. Burada $\oint ds = 2\pi R$ (ilmeğin çevresi) olması gerektiği gerçeği kullanıldı.

İlmeğin merkezindeki manyetik alanı bulmak için, Eşitlik 30.7 de $x = 0$ alırız. Böylece, bu özel nokta için,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (x = 0 \text{ da}) \quad (30.8)$$

elde edilir.

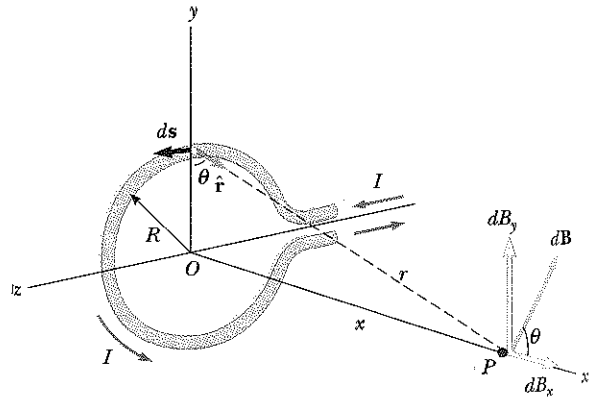
Bu sonuç Örnek 30.2'nin ki ile uyşur. Manyetik alanın davranışını, ilmekten çok uzaklarda yani, x 'in R 'ye göre çok büyük olduğu zaman belirlemek de ilginçtir. Bu durumda, Eşitlik 30.7 nin paydasındaki R^2 terimini ihmal ederek

$$B \approx \frac{\mu_0 I R^2}{2x^3} \quad (x \gg R \text{ için}) \quad (30.9)$$

elde edebiliriz. İlmeğin manyetik dipol momenti μ nün büyüklüğü, ilmekten geçen akımla ilmek yüzeyinin çarpımı, çembersel ilmeğimiz için $\mu = I(\pi R^2)$ olduğundan, Eşitlik 30.9, aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$B \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\mu}{x^3} \quad (30.10)$$

Bu sonuç biçimsel olarak, bir elektrik dipolünün uzaklarda oluşturduğu elektrik alan ifadesine yani $E = k_e(2qa)/y^3$ e benzemektedir. (Örnek 23.6 ya

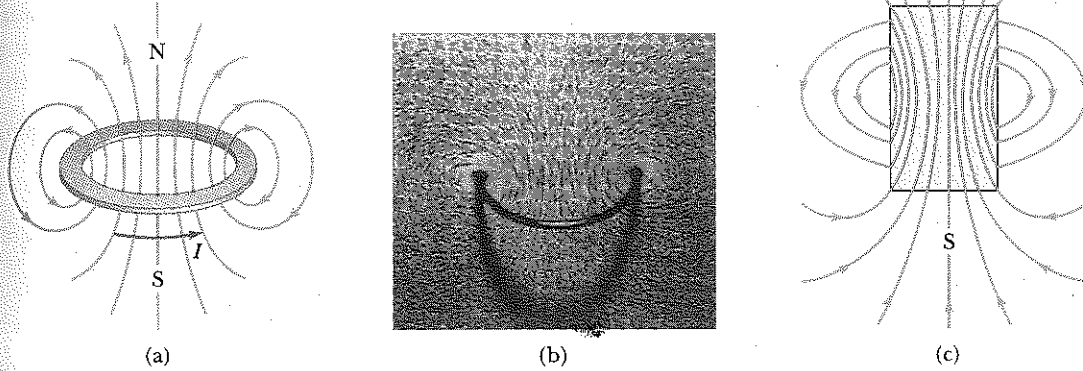


Şekil 30.5 Bir akım ilmeğinin ekseninde bulunan bir P noktasındaki manyetik alanı hesaplamaya yarayan şekil. Simetriden ötürü, toplam $\mathbf{B}$ manyetik alanı bu eksen boyuncadır.

bakınız). Eşitlik 26.16 da tanımlandığı gibi, burada $2qa = p$ elektrik dipol momentidir.

Cembersel bir ilmeğin manyetik alan çizgilerinin deseni Şekil 30.6a'da gösterilmektedir. Açıklık bakımından,

çizgiler, yalnız ilmek eksenini içine alan bir tek düzlemde gösterilmiştir. Aslında alan deseni ekstenel olarak simetrik tir ve Şekil 30.6c de gösterildiği gibi bir çubuk mıknatısın etrafındaki desene benzer.



Şekil 30.6 (a) Bir akım ilmeğini saran manyetik alan çizgileri. (b) Bir akım ilmeğini saran manyetik alan çizgilerinin demir tozları ile görülebilir hale getirilmiş (Eğitimi Geliştirme Merkezi, Newton, MA). (c) Bir çubuk mıknatısın saran manyetik alan çizgileri. Bu çizgi deseninin bir akım ilmeğinkine ne kadar benzediğine dikkat ediniz.

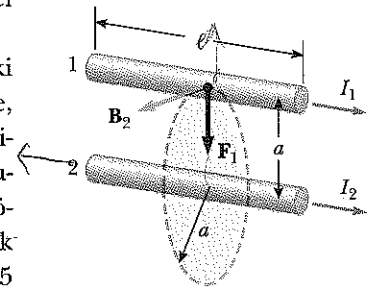
30.2 İKİ PARALEL İLETKEN ARASINDAKİ MANYETİK KUVVET

Bölüm 29 da, akım-taşıyan bir iletken bir dış manyetik alan içerisine konulduğunda üzerine etkiyen manyetik kuvveti tanıttık. Bir iletkenin geçen akım, kendi manyetik alanını oluşturduğu için, akım taşıyan iki iletkenin birbirleri üzerine manyetik kuvvet etki ettireceklerini anlamak hiçte zor değildir. Göreceğiz ki bu kuvvetler, “amper” ve “coulomb” kavramlarının tanımında temel olarak kullanılabilir.

Şekil 30.7 deki gibi aynı yönde I_1 ve I_2 akımları taşıyan ve aralarındaki uzaklık a olan iki uzun, doğrusal ve paralel tel alalım. Tellerden biri üzerine, ötekini oluşturduğu alandan ötürü etkiyen manyetik kuvveti kolayca bulabiliriz. I_2 akımını taşıyan tel-2, tel-1'in bulunduğu konumda bir B_2 alanı oluşturur. Şekil 30.7 de gösterildiği gibi B_2 'nin yönü tel-1'e diktir. Eşitlik 29.5'e göre tel-1'in ℓ uzunluğuna etkiyen manyetik kuvvet $F_1 = I_1 \ell \times B_2$ 'dir. ℓ , B_2 'ye dik olduğundan F_1 'nin büyüklüğü $F_1 = I_1 \ell B_2$ olur. B_2 nin büyüklüğü Eşitlik 30.5 ile verildiği için,

$$F_1 = I_1 \ell B_2 = I_1 \ell \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \ell \quad (30.11)$$

olduğunu görürüz. $\ell \times B_2$ aşağı yönde olduğundan, F_1 'in yönü aşağı tel-2'ye doğrudur. Eğer tel-2'nin bulunduğu yerde tel-1'in oluşturduğu alan hesaplanırsa, tel-2'ye etkiyen F_2 kuvvetinin büyüklükçe F_1 e eşit fakat ters yönde oldu-



Şekil 30.7 Kararlı akım taşıyan iki paralel tel, birbirlerine bir kuvvet etki ettirirler. 2. teldeki akımından kaynaklanan B_2 alanı, 1. tele büyüklüğü $F_1 = I_1 \ell B_2$ ile verilen bir kuvvet uygular. Akımlar, şekilde gösterildiği gibi aynı yönlü iseler kuvvet çekici, ters yönlü iseler iticidir.

ğu görülür. Bu zaten beklenen bir olaydır, çünkü Newton'un üçüncü yasası olan etki-tepki ilkesine uyulmalıdır.¹ Öte yandan akımlar zıt yönlerde olduklarında (yani, Şekil 30.7'deki akımlardan birinin yönü ters çevrilirse), kuvvetlerin yönleri tersine döner ve bu yüzden teller birbirlerini iterler. Böylece, aynı yönde akım taşıyan paralel tellerin birbirlerini çektiklerini, buna karşın zıt yönlerde akım taşıyan paralel tellerin ise birbirlerini ittiklerini görürüz.

Her iki tele de etkiyen kuvvetlerin büyüklükleri aynı olduğundan, teller arasındaki manyetik kuvvetin büyüklüğünü F_B ile gösterebiliriz. Bu büyüklüğü, telin birim uzunluğuna etkiyen kuvvet cinsinden de yazabiliriz:

Amperin tanımı

$$\frac{F_B}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (30.12)$$

İki paralel tel arasındaki kuvvet, **amper**'i aşağıdaki gibi tanımlamada kullanılabilir:

Aralarındaki uzaklık 1 m olan iki uzun, paralel telin taşıdıkları akımlar özdeş olduğunda, birim uzunluklarına etkiyen kuvvetin büyüklüğü 2×10^{-7} N/m ise, tellerden geçen akımlar birer ampër (1 A) dir.

2×10^{-7} N/m sayısal değeri, $I_1 = I_2 = 1$ A ve $a = 1$ m alarak Eşitlik 30.12'den elde edilir. Bu tanım bir kuvvete dayandığından, amper'i standard hale getirmek için mekaniksel bir ölçüm kullanılabilir. Örneğin, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü, birincil akım ölçümleri için *akım terazisi* denen bir ağıt kullanır. Bu sonuçlar, daha sonra ampermetre gibi daha alışlagelmiş diğer ağıtları standara uyduurma da kullanılır.

SI'deki yük birimi olan **coulomb**, şimdi ampër cinsinden şu şekilde tanımlanabilir:

Coulomb'un tanımı

Bir iletken 1A'lık kararlı bir akım taşımakta ise, iletkenin bir kesitinden 1s'de geçen yük miktarı 1 C'dur.

Eşitlik 30.11 ile Eşitlik 30.12'nin türetilmesinde, tellerin aralarındaki uzaklığa göre uzunlukları büyük alınmıştır. Gerçekte telin birinin uzun olması yeterlidir. Eşitlikler, uzun bir telle sadece ℓ uzunluğundaki tel arasındaki kuvveti tanımlar.

Sinama Sorusu 30.1

Şekil 30.7'de $I_1 = 2$ A, $I_2 = 6$ A ise (a) $F_1 = 3F_2$, (b) $F_1 = F_2/3$ veya (c) $F_1 = F_2$ şıklarından hangisi doğrudur?

Sinama Sorusu 30.2

Bir gevşek spiral yay, tavana asıldıktan sonra içerisinden büyük bir akım geçirilirse sarmırlar birbirlerine yaklaşırlar mı yoksa uzaklaşırlar mı?

¹ Tel-1'e etkiyen toplam kuvvet, tel-2'ye etkiyen toplam kuvvete eşit ve zıt olmakla birlikte, tellerin birbirlerine tam zıt olmayan iki küçük elemanı düşünüldüğünde, Newton'un üçüncü yasası geçerli değildir. Newton'un üçüncü yasasına ve momentumun korunumuna uymayan bu durum elektrik ve manyetizma ile ilgili daha ileri düzeydeki incelemelerde açıklanmaktadır.

web

Daha fazla bilgi için,
<http://physics.nist.gov/cuu/Units/ampere.html> sitesine giriniz.

30.3 AMPÈRE YASASI

Oersted'in sapan pusula iğnesi hakkında 1819 daki keşfi, akım-taşıyan bir telin bir manyetik alan oluşturduğunu apaçık gösterir. Bu deneyde, bir çok pusula iğnesi Şekil 30.8a'daki gibi uzun düşey bir tele yakınca yatay bir düzleme konur. Telde hiçbir akım olmadığı zaman, ilmekteki tüm pusulalar aynı yönde (yerin alanı yönünde) yönelirler. Bu doğal olarak beklenen bir olgudur. Ancak, telden kuvvetli kararlı bir akım geçerse, Şekil 30.8b'de görüldüğü gibi, tüm pusula iğneleri çembere teğet olacak yönde saparlar. Bu gözlemler, akımın oluşturduğu **B** nin yönünün Şekil 30.3'de tanıtilen sağ-el kuralı ile uyumlu olduğunu gösterir. Akımın yönü tersine çevrilirse, Şekil 30.8b'deki pusula iğneleri de tersine dönerler.

Pusula iğneleri **B** nin yönünde yöneldiklerinden, önceki kesimde tartıştığımız gibi, **B** nin alan çizgilerinin teli eksen kabul eden çemberler oluşturdukları sonucuna ulaşırız. Simetriden ötürü, **B** nin büyüklüğü, tele dik olan bir düzlem içinde kalan ve merkezi tel üzerinde olan çembersel bir yol üzerindeki her yerde aynıdır. Akımı ve telden olan *a* uzaklığını değiştirerek, Eşitlik 30.5'in betimlediği gibi, **B** nin akımla doğru ve telden uzaklıkla ters orantılı olduğu kanıtlanabilir.

Şimdi, **B** · *ds* çarpımını hesaplayıp bu çarpımların, pusula iğnelerinin tanımladığı çembersel yolun üzerindeki *ds* uzunluk elemanları için çembersel kapalı yol üzerinden toplamını alalım. Bu yol boyunca *ds* ve **B** vektörleri birbirlerine paraleldir (Şek. 30.8b), bu yüzden **B** · *ds* = *B ds* dir. Ayrıca, bu çember üzerinde **B**'nin büyüklüğü sabit olup Eşitlik 30.5 ile verilir. Bu nedenle, kapalı yol boyunca *B ds* çarpımlarının toplamı, ki bu toplam **B** · *ds* nin çizgi integraline eşdeğer olup

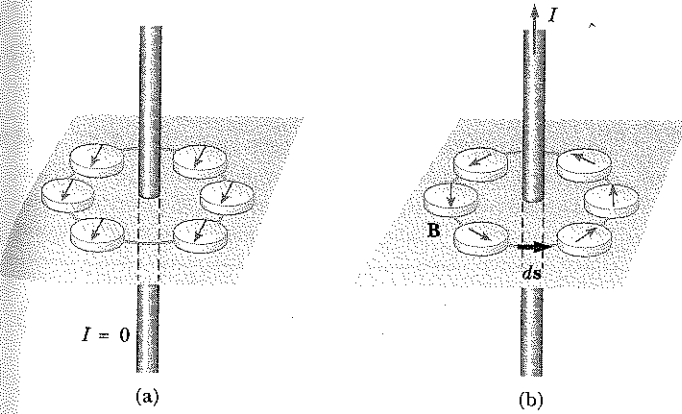
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \oint ds = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r) = \mu_0 I$$

bağıntısı ile verilir. Burada $\oint ds = 2\pi r$ çemberin çevresidir. Bu sonuç, bir teli çevreleyen özel bir çembersel yol durumu için elde edilmiş olmasına rağmen,



Andre-Marie Ampère

(1775-1836) Elektrik akımları ile manyetik alanlar arasındaki ilişkisi (elektromanyetizmayı) keşfeden ve bundan ötürü elektrik akımının birimine adı verilerek ödüllendirilen bir Fransızdır. Ampère'nin yeteneği, özellikle matematikte, 12 yaşına doğru ortaya çıkmıştı. Ancak, özel hayatı trajedilerle doludur. Zengin bir şehir memuru olan babası Fransız ihtilali sırasında öldürüldü ve karısı 1803'de genç yaşta öldü. Hayatı hakkındaki yorumu, mezar taşı için seçtiği şu yazıdan açıkça anlaşılmaktadır: *Tandem Felix* (Nihayet mutlu). (AIP Emilio Segre Görünüm Arşivinden)



Şekil 30.8 (a) Düşey telde akım olmadığı zaman, tüm pusula iğneleri aynı yönde yönelirler (Dünya'nın kuzey kutubuna doğru). (b) telden kuvvetli bir akım geçtiğinde, pusula iğneleri çembere teğet olan yönde saparlar. Bu yön, akımın oluşturduğu manyetik alanın yönüdür. (c) Akım taşıyan bir iletkeni saran çembersel manyetik alan çizgilerinin demir tozları ile görüntülenmesi. (Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle)

zamanla değişmeyen (kararlı) bir akımı çevreleyen *keyfi biçimli* bir kapalı yol için de geçerlidir. **Ampère Yasası** olarak bilinen genel durum şöyle söylenebilir:

Herhangi bir kapalı yol çevresinde $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ 'nin çizgi integrali $\mu_0 I$ 'ya eşittir. Burada I kapalı yolun çevrelediği herhangi bir yüzeyden geçen toplam sürekli akımdır:

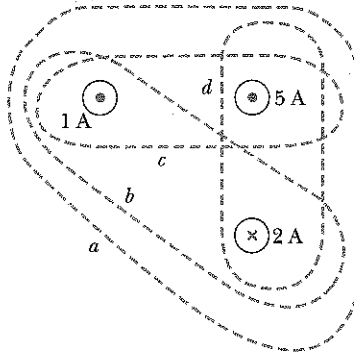
Ampère Yasası

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \quad (30.13)$$

Ampère yasası tüm sabit akım şekillenimlerinin oluşturduğu manyetik alanları betimler, ancak matematik seviyemiz yalnız oldukça yüksek simetriye sahip alan akım şekillerinin manyetik alanlarını hesaplamamıza uygundur. Kullanılışı, oldukça simetrik olan yük dağılımlarının oluşturduğu elektrik alanlarının hesaplanışındaki Gauss Yasasına benzer.

Sinama Sorusu 30.3

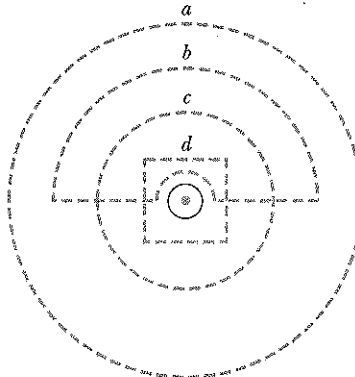
Şekil 30.9'daki kapalı yollar için $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ lerin büyüklüklerini en küçükten en büyüğe doğru sıralayınız.



Şekil 30.9 Akım-taşıyan üç telin etrafındaki dört kapalı yol.

Sinama Sorusu 30.4

Şekil 30.10'daki kapalı yollar için $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ lerin büyüklükleri en küçükten en büyüğe doğru sıralayınız.



Şekil 30.10 Akım-taşıyan bir tek tele yakın olan bir çok kapalı yol.

ÖRNEK 30.4 Uzun Bir Akım-Taşıyan Telin B Alanı

Kesitin her tarafına düzgün dağılmış kararlı bir I_0 akımı taşıyan R yarıçaplı uzun ve doğrusal bir tel veriliyor (Şek. 30.11). $r \geq R$ ve $r < R$ bölgelerinde telin merkezinden r uzaklıktaki noktalarda manyetik alanı hesaplayınız.

Çözüm $r \geq R$ durumunda; Örnek 30.1 de elde ettiğimiz sonucu bulmalıyız. Orada aynı duruma Biot-Savart yasasını uygulamıştık. Şekil 30.11 de integral yolu olarak 1 nolu çemberi seçelim. Simetriden ötürü, bu yolun üzerindeki her noktada $\mathbf{B}$ nin büyüklüğü sabit ve yönü ise $d\mathbf{s}$ ye paralel olmalıdır. 1 nolu yolun çevrelediği yüzeyden geçen toplam akım I_0 olduğu için, Ampère yasası,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 I_0$$

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \quad (r \geq R \text{ için}) \quad (30.14)$$

sonucu verir. Bu bağıntı, biçim olarak Eşitlik 30.5 e özdeş. Ampère yasasının kullanılışının Biot-Savart yasasının kullanılışından ne kadar kolay olduğuna dikkat ediniz. Oldukça simetrik durumlarda her zaman bu böyledir.

Şimdi telin içindeki $r < R$ olan bölgeyi, yani, 2 nolu bölgeyi gözönüne alalım. Bu durumda, 2 nolu yolun çevrelediği I akımının I_0 dan az olduğuna dikkat ediniz. Akımın telin kesit alanının her tarafına düzgün olarak dağıldığı

varsayıldığı için, 2 nolu yolun çevrelediği akımın toplam akıma oranı, 2 nolu yolun çevrelediği πr^2 alanının telin kesit alanına (πR^2 ye) oranına eşit olması gerekir.² Yani,

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\pi r^2}{\pi R^2}$$

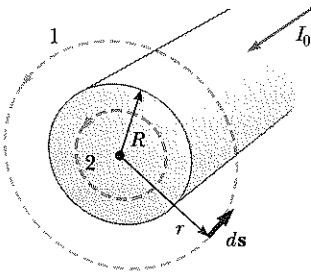
$$I = \frac{r^2}{R^2} I_0$$

1 nolu yol için izlenen sürecin aynısı burada da geçerli olduğu için Ampère yasasını 2 nolu yola da uygulayabiliriz:

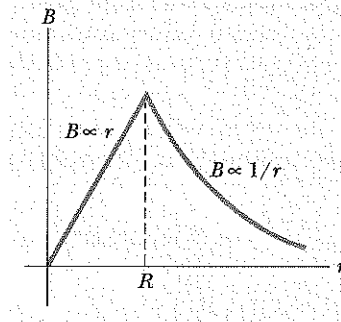
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B(2\pi r) = \mu_0 I = \mu_0 \left(\frac{r^2}{R^2} I_0 \right)$$

$$B = \left(\frac{\mu_0 I_0}{2\pi R^2} \right) r \quad (r < R \text{ için}) \quad (30.15)$$

Bu sonuç, biçimsel olarak düzgün yüklü bir kürenin içindeki elektrik alan ifadesine benzemektedir (Örnek 24.5). Bu örnekteki şekil için manyetik alanın r ile değişimi Şekil 30.12'de verilmektedir. Telin içinde $r \rightarrow 0$ olurken $\mathbf{B} \rightarrow 0$ olduğuna dikkat ediniz. Eşitlik 30.14 ve Eşitlik 30.15 eşitliklerinin $r = R$ de manyetik alanın aynı değerini verdiklerine dikkat ediniz. Bu demektir ki manyetik alan telin yüzeyinde süreklidir.



Şekil 30.11 Kesitine düzgün dağılmış kararlı bir I_0 akımı taşıyan R yarıçaplı uzun, doğrusal bir tel. Herhangi bir noktadaki manyetik alan, tel ile aynı eksenli r yarıçaplı çembersel bir yol kullanılarak Ampère yasasından hesaplanabilir.



Şekil 30.12 Şekil 30.11'deki tel için manyetik alanın büyüklüğünün r ile değişimi. Alan, telin içinde r ile orantılı, dışında ise $1/r$ ile değişir.

ÖRNEK 30.5 Bir Toroidin Oluşturduğu Manyetik Alan

Toroid denen bir ağıt (Şekil 30.13) kapalı bir bölgede hemen hemen düzgün bir manyetik alan oluşturmak için kullanılır. Bir toroid, iletken olmayan bir maddeden yapılmış simit biçimli yuvarlak, içi boş bir halkanın etrafına düzgün-

ce sarılmış N tane iletken sarımdan oluşur. Sarımların yan yana sıkıca yerleştirildiklerini varsayarak, merkezden r uzaklıkta halkanın içindeki manyetik alanı hesaplayınız.

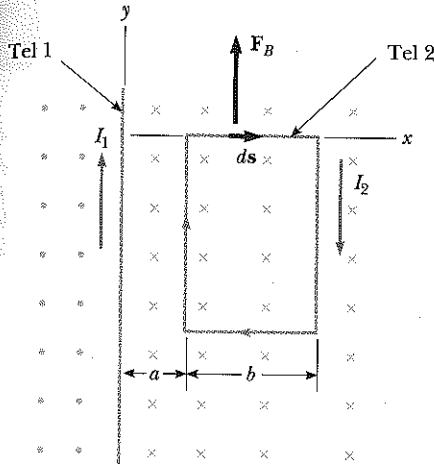
² Bu probleme bakmanın bir başka yolu, 2 nolu yolun çevrelediği akımın, $I = I_0 \pi r^2 / \pi R^2$ bağıntısı ile verilen akım yoğunluğu ile 2 nolu yolun içindeki πr^2 alanının çarpımına eşit olduğunu görmektir.

Bu sonuç beklenildiği gibi, manyetik alanın, akım levha-
sından olan uzaklığına bağlı olmadığını göstermektedir.

ÖRNEK 30.7 Bir Akım Elemanına Etkiyen Manyetik Kuvvet

Şekil 30.15'deki "Tel-1" y-ekseni boyunca uzanmakta ve I_1 kararlı akımını taşımaktadır. Telin sağ tarafına yerleştirilen ve xy düzleminde yatan dikdörtgen bir devreden I_2 akımı geçtiği zaman, Şekilde "Tel-2" olarak belirtilen ilmeğin b uzunluklu üst teline "Tel-1" in uyguladığı manyetik kuvveti bulunuz.

Çözüm Bu problemde, "Tel-2" nin dx uzunluklu küçük bir parçasına etkiyen kuvveti bulmak için Eşitlik 30.12'yi kullanmayı düşünebilirsiniz. Ancak, söz konusu eşitlik yalnızca iki paralel tele uygulanabilir ve burada kullanıla-



Şekil 30.15

maz. Doğru yaklaşım, telin küçük bir ds elemanına etkiyen $d\mathbf{F}_B = I_2 d\mathbf{s} \times \mathbf{B}$ ifadesinden hareket etmektir (Eş. 29.4). Burada $I = I_2$ ve $\mathbf{B}$ ise, uzunluğu ds olan elemanın bulunduğu yerde "Tel-1" in oluşturduğu manyetik alandır. Ampère yasasından, "Tel-1" in x uzaklıkta oluşturduğu alan (Eşitlik 30.14'e bakınız)

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi x} (-\mathbf{k})$$

ile verilir. Buradaki birim vektör $(-\mathbf{k})$, ds 'deki alanın kağıt düzleminin içine doğru olduğunu belirtmek için kullanılmıştır "Tel-2" x eksenini boyunca olduğu için, $ds = dx \mathbf{i}$ alarak,

$$d\mathbf{F}_B = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi x} [\mathbf{i} \times (-\mathbf{k})] dx = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \frac{dx}{x} \mathbf{j}$$

bulunur. $x = a$ ile $x = a + b$ arasında integrali alınarak

$$\mathbf{F}_B = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln x \Big|_a^{a+b} \mathbf{j} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{b}{a} \right) \mathbf{j}$$

elde edilir. Kuvvet, $\mathbf{j}$ gösterimi ile belirtildiği gibi Şekil 30.15'te gösterildiği gibi, pozitif y yönündedir.

Alıştırma b uzunluklu alt tele etkiyen kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir?

Cevap Kuvvet, üst yatay elemana etkiyen kuvvetle aynı büyüklükte, fakat aşağı doğru yönelmiştir.

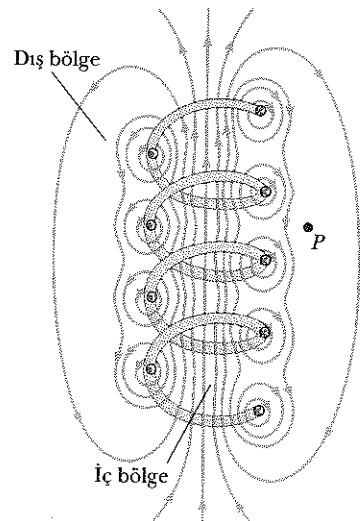
Sinama Sorusu 10.1

Örnek 30.7'deki akım ilmeğine net bir kuvvet etki ediyor mu? Net bir tork etki ediyor mu?

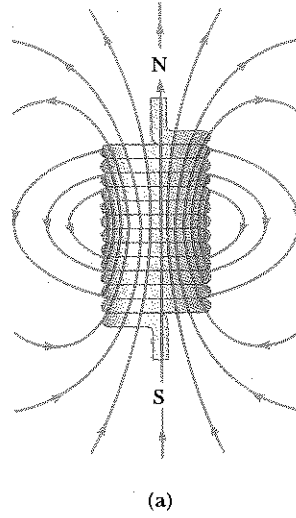
30.4 BİR SOLENOİDİN MANYETİK ALANI

Bir solenoid (akım makarası), helis biçiminde sarılmış uzun bir teldir. Sıkışık sarımlı bir solenoidin içindeki bölgenin küçük bir hacminde düzgün varsayılabilir bir manyetik alan elde edilebilir. Sarımlar sıkışık olduğunda her birine bir çember gözüyle bakılabilir ve net manyetik alan tüm sarımlardan kaynaklanan alanların vektörel toplamıdır.

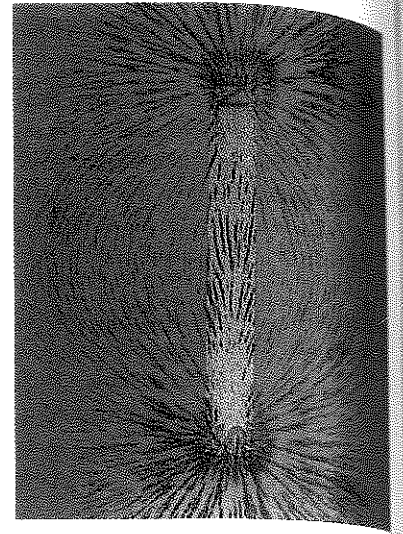
Şekil 30.16, gevşek sarılmış bir solenoidin manyetik alan çizgilerini göstermektedir. İç bölgesindeki alan çizgilerinin birbirlerine hemen hemen paralel, düzgün dağılmış ve yakın olduklarına dikkat ediniz. İki komşu sarım üzerindeki akım elemanları arasındaki alan çizgileri birbirlerinin etkilerini yok ederler. Çünkü iki elemandan kaynaklanan alan vektörleri birbirlerine zıttır. Solenoidin dışındaki alan hem düzgün değil hem de zayıftır. P gibi dış noktalarda alan zayıftır. Çünkü sarımların sağ tarafındaki akım elemanlarından kaynaklanan manyetik alan sol tarafındaki elemanlardan kaynaklanan alanı yok etmeye çalışır.



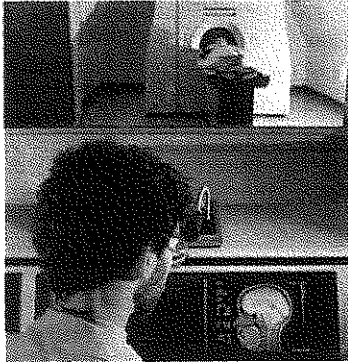
Şekil 30.16 Gevşek biçimde sarılmış bir solenoidin manyetik alan çizgileri.



(a)



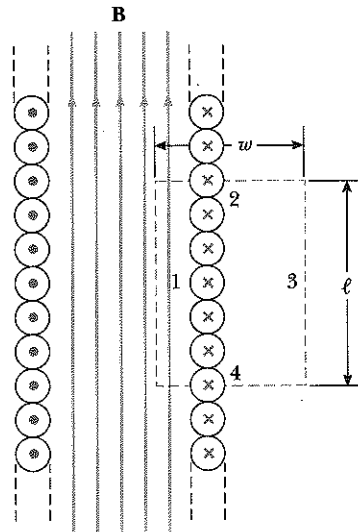
(b)



Bir teknisyen bir hastanın kafatasının görüntüsünü inceliyor. Görüntü, manyetik rezonans görüntüleme (MR) denen bir hastalık teşhis tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Manyetik rezonans aygıtı süper-iletken solenoidlerin oluşturduğu manyetik alanları kullanır. (Hank Morgan/Science Source)

Şekil 30.17 (a) Kararlı bir akım taşıyan sonlu uzunlukta sıkıca sarılmış bir solenoidin manyetik alan çizgileri. Solenoidin iç bölgesindeki alan hemen hemen düzgün ve kuvvetlidir. Alan çizgilerinin çubuk mıknatısın alan çizgilerine benzediğine dikkat ediniz. Bu nedenle, solenoid kuzey ve güney kutupları varmış gibi davranır. (b) Bir çubuk mıknatısın manyetik alan deseni, bir kağıt parçası üzerindeki demir tozları yardımıyla görsel hale getirilmiştir. (Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle)

Sarımlar, sıkı sıkı sarılmış ve solenoid sonlu uzunlukta ise, alan çizgileri Şekil 30.17a da görüldüğü gibidir. Bu alan çizgilerinin dağılımı bir çubuk mıknatısın alan çizgilerine benzer (Şekil 30.17b ye bakınız). Bu yüzden, solenoidin bir ucu çubuk mıknatısın kuzey kutbu gibi davranırken öteki ucu güney kutbu gibi davranır. Solenoidin uzunluğu arttırıldıkça, içindeki alan gitikçe daha düzgün hale gelirken dış bölgesindeki alan zayıflar. Sarımlar sıkıca sarıldıkları ve solenoidin uzunluğu yarıçapına göre oldukça fazla olduğu zaman *ideal bir solenoid* durumuna yaklaşırlar. Bu durumda, solenoidin dışındaki alan sıfır ve iç bölgesindeki alan ise oldukça büyük bir hacimde düzgün olur.



Şekil 30.18 İdeal bir solenoidin kesitten görünüşü. İçindeki alanı düzgün, dışındakini sıfır varsayabiliriz. Kırmızı kesik çizgili dikdörtgene Ampère yasası uygulanarak solenoidin iç bölgesindeki alanın büyüklüğü hesaplanabilir.

İdeal bir solenoidin iç bölgesindeki manyetik alan ifadesini elde edebilmek için Ampère yasasını kullanabiliriz. Şekil 30.18, I akımı taşıyan böyle bir solenoidin bir parçasının uzunluğuna bir kessitini göstermektedir. Solenoid ideal olduğundan iç bölgesinde $\mathbf{B}$ düzgün ve solenoidin eksenine paralel, fakat dışındaki bölgede $\mathbf{B}$ sıfırdır. Şekil 30.18 de gösterildiği gibi uzunluğu ℓ ve genişliği w olan dikdörtgeni ele alalım. Bu dikdörtgein dört kenarı boyunca $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin integralini alarak, Ampère yasasını uygulayabiliriz. Kenar-3 boyunca olan katkı kuşkusuz sıfırdır; çünkü bu bölgede $\mathbf{B} = 0$ dır. 2 ve 4 numaralı kenarların her ikisinden gelen katkı da sıfırdır, çünkü bu yollar boyunca $\mathbf{B}$ alanı $d\mathbf{s}$ 'ye diktir. Uzunluğu ℓ olan kenar-1'in integrale katkısı $B\ell$ dir; çünkü bu yol boyunca $\mathbf{B}$ düzgün ve $d\mathbf{s}$ 'ye paraleldir. Bu nedenle, kapalı dikdörtgensel yol boyunca integralin değeri,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \int_{\text{yol 1}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \int_{\text{yol 1}} ds = B\ell$$

dir. Ampère yasasının sağ tarafı integralin alındığı kapalı yolun çevrelediği yüzeyden geçen toplam akımı içerir. Şimdiki durumda dikdörtgen yolun çevrelediği yüzeyden geçen toplam akım, herbir sarımdan geçen akımla yüzeyin içindeki sarım sayısının çarpımına eşittir. ℓ uzunluğunda bulunan sarım sayısı N ise, dikdörtgenin içinden geçen toplam akım NI olur. O halde, Ampère yasası bu yola uygulandığında,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B\ell = \mu_0 NI$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu_0 nI \quad (30.17)$$

bulunur. Burada $n = N/\ell$ birim uzunluktaki sarım sayısıdır. Bu sonucu, toroid şeklindeki bir kangalın (bobinin) manyetik alanını (Örnek 30.5) dikkate alarak da benzer biçimde elde edebiliriz. N sarımdan oluşan toroidin r yarıçapı kesit alanının yarıçapı olan a dan oldukça büyükse, toroidin küçük bir kesimi yaklaşık olarak bir solenoid oluşturur; burada $n = N/2\pi r$ ile verilir. Bu sınır durumunda, toroid için elde edilen Eşitlik 30.16, Eşitlik 30.17 ile uyur.

Eşitlik 30.17, oldukça uzun bir solenoidin merkezine yakın (yani; uçlardan oldukça uzak) olan noktalar için geçerlidir. Beklendiği gibi, uçlara yakın yerlerdeki alan, Eşitlik 30.17 ile verilen değerden daha küçüktür. Uzun bir solenoidin tam uçlarındaki alanın büyüklüğü, ortadaki değerden yaklaşık yarısı kadar olur.

Ev Deneyi

Bir pusulanın etrafında bir teli bir kaç kere sar, bir başka deyişle pusulayı bir solenoidin içine koy. Telin iki ucunu bir pilin uçlarına dokundur. Pusulaya ne olur? Pusula telin sarımlarının dışında olduğunda da etki aynı derecede mi?

Bir solenoid içindeki manyetik alan

web

Bir solenoidin eksen boyuncaki manyetik alanın daha ayrıntılı bir tartışması için, www.saunderscollege.com/physics/ sitesine giriniz.

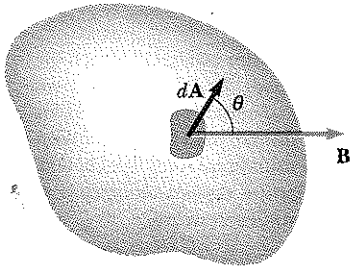
30.5 MANYETİK AKI

Manyetik alanla ilgili akı da elektrik akısının tanımlandığı gibi tanımlanır. (Eş. 24.3'e bak). Şekil 30.19 da olduğu gibi keyfi şekilli bir yüzey üzerinde alanı $d\mathbf{A}$ olan bir yüzey elemanı alalım. Bu elemandaki manyetik alan $\mathbf{B}$ ise, elemandan geçen manyetik akı $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ dır. Burada $d\mathbf{A}$, büyüklüğü dA alanına eşit ve yönü yüzeye dik olan bir vektördür. Böylece, tüm yüzeyden geçen toplam manyetik akı Φ_m ,

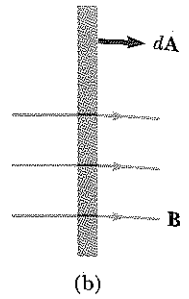
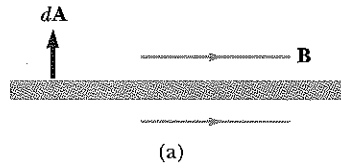
$$\Phi_B \equiv \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (30.18)$$

bağıntısı ile verilir.

Manyetik akının tanımı



Şekil 30.19 Bir dA yüzey elemanından geçen manyetik akı, $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = BdA \cos \theta$ ile verilir. $d\mathbf{A}$ 'nın yüzeye dik olduğu dikkat ediniz.



Şekil 30.20

(a) Manyetik alan, düzlemin yüzeyine paralel olduğu zaman, düzlemden geçen akı sıfırdır (yandan bir görünüş). (b) Manyetik alan düzleme dik olduğunda düzlemden geçen akı maksimumdur.

Özel bir durum olarak, yüzey alanı A olan bir düzlem ve $d\mathbf{A}$ vektörü ile θ açısı yapan düzgün bir $\mathbf{B}$ manyetik alanı alalım. Bu durumda, düzlemden geçen manyetik akı,

$$\Phi_B = BA \cos \theta \quad (30.19)$$

olur. Manyetik alan, Şekil 30.20a da görüldüğü gibi düzleme paralel olursa, $\theta = 90^\circ$ ve akı sıfırdır. Öte yandan alan Şekil 30.20b deki gibi düzleme dik olursa $\theta = 0^\circ$ ve akı BA (maksimum değer) olur.

Akının birimi $\text{T} \cdot \text{m}^2$ Buna *weber* (Wb) denir; $1\text{Wb} = 1 \text{T} \cdot \text{m}^2$ dir.

ÖRNEK 30.8

Dikdörtgen Bir İlmeğin Geçen Akı

Genişliği a ve uzunluğu b olan dikdörtgen bir ilmek, I akımı taşıyan uzun bir telden c uzaklığa yerleştirilmiştir (Şek. 30.21). Tel, ilmeğin uzun kenarına paraleldir. Teldeki akımın ilmekten geçirdiği toplam manyetik akıyı bulunuz.

Çözüm Eşitlik 30.14 teki doğrusal ve uzun bir telin kendisinden r uzaklıkta oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünün

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

ile verildiğini biliyoruz. $1/r$ faktörü, alanın ilmeğin bulunduğu bölgede değiştiğini, Şekil 30.21 ise yönünün kağıt düzleminin içine doğru olduğunu gösterir. İlmeğin içinde $\mathbf{B}$, $d\mathbf{A}$ 'ya paralel olduğundan $d\mathbf{A}$ yüzey elemanından geçen akıyı,

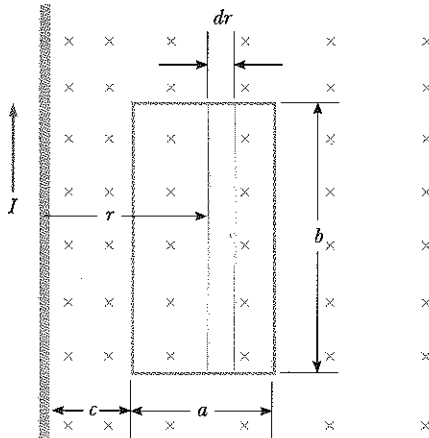
$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \int \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dA$$

biçiminde yazabiliriz. ($\mathbf{B}$ düzgün olmayıp r ye bağlı olduğu için integralin dışına çıkarılamaz.)

İntegrali almak için, önce Şekil 30.21 deki yüzey elemanını $dA = b dr$ şeklinde ifade ederiz. Şimdi integralde görülen değişken yalnız r olduğu için,

$$\begin{aligned} \Phi_B &= \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \int_c^{a+c} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln r \Big|_c^{a+c} \\ &= \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{a}{c} \right) \end{aligned}$$

Alıştırma $\ln(1+x)$ için seri açılımı yapılırsa (Bak. Ek B.5), halkanın telden yeterince uzak olduğu durumlarda (başka deyişle $c \gg a$ için) bu eşitlik uygun bir sonuç verir.



Şekil 30.21 I akımı taşıyan doğru ve uzun telin, ilmeğin bulunduğu bölgede oluşturduğu manyetik alan düzgün değildir.

Cevap $\Phi_B \rightarrow 0$

30.6 MANYETİZMADA GAUSS YASASI

Bölüm 24 de bir net yükü içine alan (sarı) kapalı bir yüzeyden geçen elektrik alan akısının, o net yükle orantılı olduğunu bulmuştuk (Gauss yasası). Başka bir deyişle, kapalı yüzeyden çıkan elektrik alan çizgilerinin sayısı yalnızca içindeki net yüke bağlıdır. Bu özellik, kısmen elektrik alan çizgilerinin elektrik yüklerinden doğması ve elektrik yüklerinde sona ulaşması gerçeğine dayanmaktadır.

Durum, manyetik alanlar için oldukça farklıdır. Manyetik alan çizgileri sürekli olup kapalı ilmekler oluştururlar. Bir başka deyişle manyetik alan çizgileri, herhangi bir noktadan başlamaz ya da bir noktada sona ermez. Şekil 30.22'deki çubuk mıknatısın manyetik alan çizgileri bu noktayı açıklamaktadır. Sınırları, Şekil 30.22 deki kesikli kırmızı çizgi ile belirtilen gibi herhangi bir kapalı yüzeye giren alan çizgilerinin sayısının, bu yüzeyden çıkan çizgilerin sayısına eşit olduğuna dikkat ediniz. Bu nedenle, kapalı yüzeyden geçen net manyetik akı *sıfırdır*. Bu durum, bir elektrik dipolünün yüklerinden birini sarı kapalı bir yüzey durumuna terstir (Şek. 30.23); orada net elektrik akısı sıfır değildir.

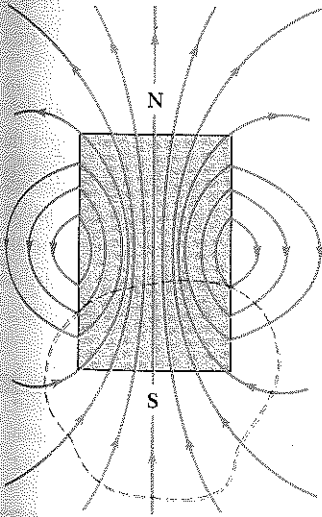
Manyetizmadaki Gauss yasası,

herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net manyetik akının her zaman sıfır olduğunu belirtir:

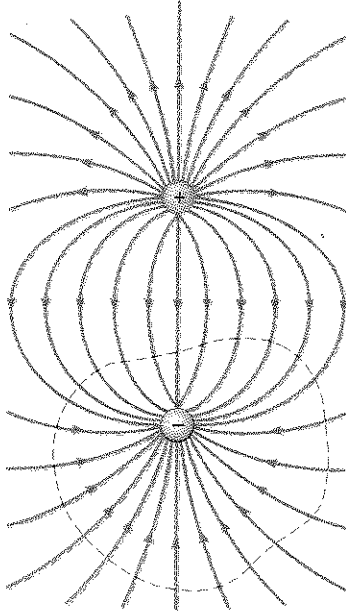
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (30.20)$$

Manyetizmada Gauss Yasası

Bu yargı, Bölüm 29'un açısında belirtildiği gibi, **yalıtılmış manyetik kutupların (ya da tek-kutupların) bu güne kadar deneysel olarak algılanamadığı gerçeğine dayanmaktadır. Belki de böyle bir kutup hiç yoktur.** Buna rağmen, bilim adamları araştırmayı sürdürmektedir. Çünkü, bunun dışındaki temel fiziksel



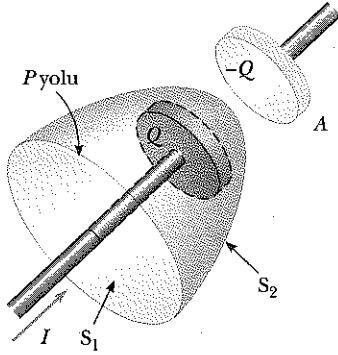
Şekil 30.22 Bir çubuk mıknatısın manyetik alan çizgileri kapalı ilmekler oluştururlar. Kutuplardan birini içine alan kapalı yüzeyden geçen net akının (veya başka bir kapalı yüzey) sıfır olduğuna dikkat ediniz.



Şekil 20.23 Bir elektrik dipolünün elektrik alan çizgileri pozitif yükten başlarlar ve negatif yüke sona ererler. Yüklerden birini içine alan kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısı sıfır değildir.

davranışları açıklamada başarılı olan bazı teoriler, tek-kutupların olabileceğini önermektedir.

30.7

YERDEĞİŞTİRME AKIMI VE
AMPÈRE YASASININ GENEL BİÇİMİ

Şekil 30.24 Bir kondansatörün plakasına yakın olan S_1 (mavi) ve S_2 (kırmızı) yüzeyleri aynı P yolu ile çevrelenmiş. Teldeki iletim akımı yalnız S_1 den geçer. Bu, Ampère yasasında bir uyumsuzluğa götürür. Bu uyumsuzluk, ancak S_2 den bir yerdeğiştirme akımının geçtiği postülat olarak ileri sürülürse ortadan kalkabilir.

Hareket halindeki yüklerin ya da akımların manyetik alanlar oluşturduklarını gördük. Akım taşıyan bir iletken yüksek bir simetriye sahipse, oluşturduğu manyetik alanı hesaplayabilmek için Ampere yasasını kullanabiliriz. Eşitlik 30.13 yani, $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$ daki çizgi integrali, iletim akımının içinden geçtiği bölgeyi çevreleyen herhangi bir kapalı yol üzerinden alınır ve iletim akımı $I = dq/dt$ bağıntısı ile tanımlanır. Şimdi, **Ampère yasasının bu biçiminin, elektrik alanı yalnız zamanla değişmiyorsa geçerli olduğunu** göstereceğiz. Maxwell, bu sınırlamanın farkına vardı ve Ampère yasasını tüm olası durumları içerecek biçimde düzeltti.

Bu problemi, Şekil 30.24 de şekillendirilen gibi yüklenmekte olan bir kondansatörü inceleyerek anlayabiliriz. Bir iletim akımı olduğunda pozitif plakadaki yük değişir, fakat *plakalar arasındaki aralıktan hiç iletim akımı geçmez*. Şimdi Şekil 30.24 deki gibi aynı P yolunun çevrelediği S_1 ve S_2 yüzeylerini dikkate alalım. Ampère yasası, $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin bu yol boyunca çizgi integralinin $\mu_0 I$ ya eşit olması gerektiğini söyler. Burada I , P yolunun çevrelediği herhangi bir yüzeyden geçen toplam akımdır.

P yolunun S_1 'i çevrelediği düşünülürse, $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$ dır. Çünkü iletim akımı S_1 den geçer. Fakat, P yolunun S_2 'yi çevrelediği düşünülürse, $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$ olur, çünkü S_2 den hiç bir iletim akımı geçmez. O halde, akımın süreksizliğinden kaynaklanan bir ters duruma ulaştık! Maxwell, Eşitlik 30.13 ün sağına **yerdeğiştirme akımı**, I_d , denen³ ve

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (30.21)$$

biçiminde tanımlanan ek bir terim koyarak, bu problemi çözdü. Φ_E 'nin $\Phi_e = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$ biçiminde tanımlanan elektrik alan akısı olduğunu anımsayınız (Eşitlik 24.3 e bakınız).

Kondansatör yüklenirken (ya da boşalırken), levhaların arasındaki *değişken* elektrik alanı, teldeki iletim akımının devamı olan bir akıma eşdeğer düşünülebilir. Eşitlik 30.21 ile verilen yerdeğiştirme akımı ifadesi, Ampère yasasının sağ tarafına eklenirse, Şekil 30.24'ün temsil ettiği güçlük ortadan kalkar. P yolunun çevrelediği yüzey ne olursa olsun ya iletim ya da yerdeğiştirme akımı ondan geçecektir. Bu yeni I_d terimi ile, Ampère yasasının genelleştirilmiş biçimini (bazen **Ampère-Maxwell Yasası** denir),

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (30.22)$$

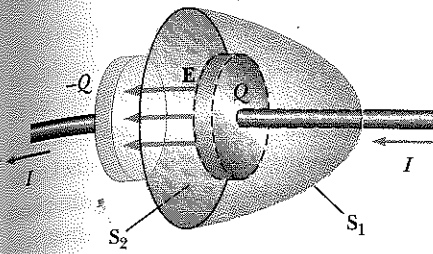
şeklinde ifade edebiliriz.⁴

³ Buradaki yerdeğiştirme, Bölüm 2 de kullanıldığı anlamda değildir. Tam doğru olmayan anlamlara gelmesine rağmen kelime, tarihsel süreç içerisinde fizik diline girdi, bu yüzden kullanmaya devam ediyoruz.

⁴ Bu ifadenin yalnız boşlukta geçerli olduğunu belirtmek gerekir. Şayet manyetik ortam varsa, Eşitlik 30.22 nin sağındaki μ_0 ve ϵ_0 sırayla maddenin manyetik geçirgenliği μ_m ve elektriksel geçirgenliği ϵ ile değiştirilmelidir. Ayrıca, Ampère yasasını tam olarak genelleştirebilmek için Eşitlik 30.27 nin sağ tarafına bir de I_m ile gösterilen mıknatıslanma akımını da koymak gerekmektedir. Mikroskobik ölçekte, I_m de iletim akımı I kadar gerçek bir akımdır.

Yer değiştirme akımı

Ampère-Maxwell Yasası



Şekil 30.25 Kondansatör plakalarına bağlı olan tellerden geçtiği için iletim akımı $I = dQ/dt$ S_1 den geçer fakat S_2 den geçmez. S_2 den yalnız yerdeğiştirme akımı $I_d = \epsilon_0 d\phi/dt$ geçer. Süreklilik gereği iki akım birbirlerine eşit olmalıdır.

Bu ifadenin anlamı, Şekil 30.25 incelenerek anlaşılabilir. S_2 den geçen elektrik akısı $\Phi_E = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = EA$ dır. Burada A kondansatörün plakalarının yüzey alanı ve E plakalar arasındaki düzgün elektrik alanının büyüklüğüdür. Q herhangi bir anda plakalardaki yük ise, $E = Q/\epsilon_0 A$ (Kesim 26.2) elde edilir. O halde, S_2 den geçen elektrik akısı,

$$\Phi_E = EA = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

dır. Böylece S_2 den geçen yerdeğiştirme akımı I_d ,

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (30.23)$$

olur. Yani S_2 den geçen yerdeğiştirme akımı, S_1 den geçen iletim akımı I ye tam olarak eşittir!

S_2 yüzeyini inceleyerek yerdeğiştirme akımını, yüzey sınırındaki manyetik alanın kaynağı olarak yorumlayabiliriz. Yerdeğiştirme akımının fiziksel kaynağı ise zamanla-değişen elektrik alandır. O halde, bu formalizmanın (biçimlenişin) can alıcı noktası,

manyetik alanları, hem iletim akımlarının, hem de zamanla-değişen elektrik alanlarının oluşturabilir olmasıdır.

Bu sonuç, Maxwell'in kuramsal çalışmasının oldukça dikkat çeken bir örneği idi ve elektromanyetizmanın anlaşılmasında pekçok gelişmeye katkıda bulundu.

Sınama Sorusu 30.6

Tam olarak yüklenmiş $3\mu\text{F}$ lık bir kondansatör için yerdeğiştirme akımı nedir?

ÖRNEK 30.9 Bir Kondansatördeki Yerdeğiştirme Akımı

$8\mu\text{F}$ lık bir kondansatörün uçları arasına frekansı 3 kHz ve voltaj genliği 30 V olan bir ac gerilimi uygulandığında kondansatörün levhaları arasındaki yerdeğiştirme akımını bulunuz.

Çözüm Kaynağın açısal frekansı Eşitlik 13.6 dan, $\omega = 2\pi f = 2\pi (3 \times 10^3 \text{ Hz}) = 1,88 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ dir. Buradan kondansatörün uçları arasındaki gerilimin zamana bağlı ifadesi,

$$\Delta V = \Delta V_{\text{maks}} \sin \omega t = (30 \text{ V}) \sin (1,88 \times 10^4 t)$$

dir. Yerdeğiştirme akımını bulmak için kondansatördeki

yükün $Q = CV$ ile verildiğini hatırlayıp Eşitlik 30.23 ü kullanabiliriz:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} (C\Delta V) = C \frac{d}{dt} (\Delta V) \\ &= (8,00 \times 10^{-6} \text{ F}) \frac{d}{dt} [(30,0 \text{ V}) \sin(1,88 \times 10^4 t)] \\ &= (4,52 \text{ A}) \cos(1,88 \times 10^4 t) \end{aligned}$$

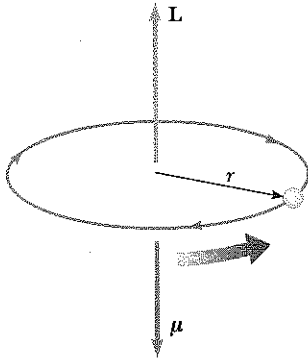
Buna göre, yerdeğiştirme akımı zamanla sinüsel olarak değişir ve maksimum değeri $4,52\text{ A}$ dir.

Seçmeli Kesim

30.8 MADDE İÇİNDE MANYETİZMA

Bir tel sargıdaki akımın oluşturduğu manyetik alan, bazı maddelerin kuvvetli manyetik özellikler göstermelerinin nedeni konusunda ipucu vermektedir. Daha önce, Şekil 30.17 dekine benzer bir kangalın bir kuzey ve bir de güney kutbu olduğunu bulmuştuk. Genelde, *herhangi bir* akım ilmeği, bir manyetik alana ve buna karşılık gelen bir manyetik momente sahiptir. Buna atomun bazı modellerinde betimlenen atomik düzeydeki akım-ilmekleri de dahildir. Bu nedenle, mıknatıslanmış bir maddedeki manyetik momentlerin, bu atomik düzeydeki akım ilmeklerinden kaynaklandığı söylenebilir.

Atomun Bohr modeli için, bu akım ilmekleri çekirdeklerin etrafındaki çembersel yörüngelerde bulunan elektronların hareketlerinden kaynaklanır. Ayrıca, elektronların, protonların nötronların ve diğer bazı parçacıkların "spin" denen bir iç özelliğinden kaynaklanan bir başka manyetik momentleri daha vardır.



Şekil 30.26 r yarıçaplı bir çember üzerinde dolanan bir elektron, zıt yönlerde olmak üzere bir açısal momentuma (L) ve bir manyetik momente (μ) sahiptir.

Atomların Manyetik Momentleri

Tartışmamıza, elektronların oldukça ağır bir çekirdek etrafındaki çembersel yörüngelerde dolandığını varsayan klasik atom modeli ile başlamak eğitici olacaktır. Bu modelde, yörüngede dolanan bir elektronun, küçük bir akım ilmeği oluşturduğu düşünülür ve elektronun manyetik momenti bu yörüngesel hareketiyle ilgilidir. Bu modelin pek çok yetersizlikleri varsa da, kuantum fizikinin önerdiği doğru teori ile iyi bir uyum içindedir.

Şekil 30.26 da gösterildiği gibi çekirdek etrafında r yarıçaplı çembersel bir yörüngede sabit v hızı ile hareket eden bir elektronu ele alalım. Elektron, $2\pi r$ 'lik (çemberin çevre uzunluğu) bir mesafeyi T zamanda aldığı için yörüngesel süratı $v = 2\pi r/T$ dir. Dolanan bu elektronu temsil eden I akımı, elektronun yükünün bir dolanım için geçen zamana bölümüne eşittir. $T = 2\pi/\omega$ ve $\omega = v/r$ bağıntılarını kullanarak

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r}$$

elde edilir. Bu etkin akım ilmeğinin oluşturduğu manyetik moment $\mu = IA$ dir. Burada $A = \pi r^2$ yörüngenin çevrelediği alandır. O halde,

$$\mu = IA = \left(\frac{ev}{2\pi r} \right) \pi r^2 = \frac{1}{2} e v r \quad (30.24)$$

olur. Elektronun yörüngesel açısal momentumunun büyüklüğü $L = m_e v r$ ($\phi = 90^\circ$ için Eşitlik 11.16) olduğundan, yörüngesel manyetik momenti

$$\mu = \left(\frac{e}{2m_e} \right) L \quad (30.25)$$

şeklinde yazılabilir. Bu sonuç, **elektronun manyetik momentinin, yörüngesel açısal momentum ile orantılı olduğunu söylemektedir**. Elektron negatif yüklü olduğundan, μ ve L vektörlerinin zıt yönlerde yönelmiş olduklarına dikkat ediniz. Şekil 30.26 da belirtildiği gibi her iki vektör de yörünge düzlemine diktir.

Kuantum fizikinin bir temel sonucu, yörüngesel açısal momentumun kesikli (quantize) ve her zaman $\hbar = h/2\pi = 1,06 \times 10^{-34}$ J.s'nin bir tam katı olması gerektiğidir (Burada h , Planck sabitidir.). Elektronun yörüngesel hareketinden kaynaklanan manyetik momentinin sıfır olmayan en küçük değeri,

$$\mu = \sqrt{2} \cdot \frac{e}{2m_e} \hbar \quad (30.26)$$

dir. Eşitlik 30.26 ya benzeyen bağıntıların nasıl elde edildiğini Bölüm 42 de göreceğiz.

Yörüngesel manyetik moment

Açısal momentum kesiklidir

Tüm maddeler elektron içerdiklerine göre, bir kısmının niçin manyetik olmadıklarını merak edebilirsiniz. Temel neden, maddelerin çoğunda, atomdaki bir elektronun manyetik momentinin yine aynı atomun ters yönde dolanan diğer bir elektronunun manyetik momenti tarafından dengelenerek etkisiz hale getirilmesidir. **Maddelerin çoğu için, sonuç olarak, elektronların yörüngesel hareketinin oluşturduğu manyetik etki ya sıfır ya da oldukça küçüktür.**

Yörüngesel manyetik momentinden başka, elektronun **spin** denen bir başka iç özelliği daha vardır; manyetik momentine bu da katkıda bulunur. Bu yönüyle elektrona, çekirdeğin etrafında yörüngesel hareketini yaparken aynı zamanda Şekil 30.27 deki gibi kendi eksenini etrafında dönen bir küresel yük gözüyle de bakılabilir. (Bu klasik tanım tam olarak doğru kabul edilmemelidir çünkü spin kuantum mekaniksel bir analize dahil edilmesi gereken göreceli dinamikten kaynaklanır.) Spinle ilgili açısal momentumun S büyüklüğü, yörüngesel hareketten kaynaklanan açısal momentumla aynı mertebededir. Kuantum teorisinin öngördüğü spin açısal momentumunun büyüklüğü,

$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

ve bir elektron spininin oluşturduğu manyetik moment

$$\mu_{\text{spin}} = \frac{e\hbar}{2m_e} \quad (30.27)$$

dir. Sabitler cinsinden elde edilen bu ifadeye **Bohr Magnetonu**

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T} \quad (30.28)$$

denir. O halde atomik manyetik momentler Bohr Magnetonu cinsinden verilebilirler (Not: $1 \text{ J/T} = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{dir}$):

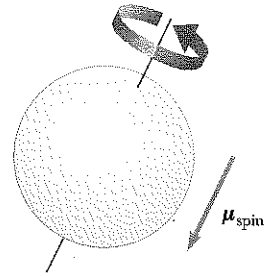
Çok sayıda elektronu olan atomlarda elektronlar genellikle spinleri *zıt* yönecek biçimde çiftler oluştururlar; böylece spin manyetik momentleri birbirlerini yok ederler. Fakat, tek sayıda elektronu olan atomların en azından bir tane “çiftlenmemiş” elektronu ve buna karşılık gelen bir spin manyetik momenti olması gerekir. Bir atomun toplam manyetik momenti, yörüngesel ve spin manyetik momentlerinin vektörel toplamıdır. Tablo 30.1 de birkaç örnek verilmektedir. Helyum ve neonun momentlerinin sıfır olduğuna dikkat ediniz. Bunların bireysel spin ve yörünge momentleri birbirlerini yok ederler.

Bir atom çekirdeğinin de proton ve nötronlarından kaynaklanan manyetik momenti vardır. Ancak, bir protonun ya da nötronun manyetik momenti, elektronun manyetik momentinin yanında çok küçük kalır ve genellikle ihmal edilebilir. Bu durumu Eşitlik 30.28 i inceleyerek ve elektronun kütlesi yerine bir protonun veya nötronun kütlesini koyarak anlayabiliriz. Proton ve nötronun kütleleri, elektroun kütlesinden çok çok büyük olduklarından, manyetik momentleri yaklaşık 10^3 kere daha küçüktür.

Mıknatıslanma Vektörü ve Manyetik Alan Şiddeti

Bir maddenin manyetik durumu, **mıknatıslanma vektörü (M)** denen bir nicelik ile betimlenir. **Bu vektörün büyüklüğü, maddenin birim hacminin net manyetik momentine eşittir.** Tahmin edebileceğiniz gibi, bir maddedeki toplam manyetik alan B , hem uygulanan (dış) alana (B_0) ve hem de maddenin mıknatıslanmasına bağlıdır.

Böyle durumlarda, B toplam manyetik alanını ölçmeyi içeren problemleri anlamak için şunu ele alalım: Manyetik alanları ölçmek için bilim adamları



Şekil 30.27 Dönen bir elektronun klasik modeli. Bu model, doğru olmayan bir manyetik moment büyüklüğü, doğru olmayan kuantum sayıları ve çok fazla serbestlik derecesi verir.

Spin açısal momentumu

Bohr magnetonu

TABLO 30.1 Bazı Atomların ve İyonların Manyetik Momentleri

Atom (veya iyon)	Manyetik Moment (10^{-24} J/T)
H	9,27
He	0
Ne	0
Ce ³⁺	19,8
Yb ³⁺	37,1

Manyetik vektörü M

Hall olayına (Kesim 29.6 ya bakınız) dayanan küçük algılayıcılar kullanılır. Böyle bir algılayıcı, sayfa 951'deki Ev Deneyi'nde sözü edilen solenoidin içine yerleştirilseydi pusulayı solenoidin içine soktuğunuzda ne görecekti? Pusula bir manyetik madde olduğundan, algılayıcı solenoid (dış) alanı $\mathbf{B}_0$ ile pusulanın oluşturduğu (mıknatıslanma) alanı $\mathbf{B}_m$ nin toplamından oluşan $\mathbf{B}$ toplam manyetik alanını ölçer. Bu bize akımlardan kaynaklanan manyetik alanları manyetik maddelerden kaynaklanan alanlardan ayırt etmek için bir yola gereksinimimiz olduğunu söyler. Akım-taşıyan bir iletkenin oluşturduğu $\mathbf{B}_0$ manyetik alanının bulunduğu bir bölge düşünelim. Şimdi o bölgeyi bir manyetik madde ile doldurursak, bölgedeki *toplam* alan $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m$ olacaktır. Burada $\mathbf{B}_m$ manyetik maddenin oluşturduğu alandır. Bu katkı, maddenin mıknatıslanma vektörü cinsinden $\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M}$ şeklinde ifade edilebilir. Böylece, bölgedeki toplam alan

Manyetik alan şiddeti $\mathbf{H}$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M} \quad (30.29)$$

olur. Mıknatıslanmadan kaynaklanan manyetik alanları analiz ederken maddenin içinde **manyetik alan şiddeti** ($\mathbf{H}$) denen başka bir alan niceliği tanımlamak kolaylık sağlamaktadır. Manyetik alan şiddeti, tellerdeki iletim akımlarının maddeye etkisini temsil eder. Alan şiddeti $\mathbf{H}$ ile $\mathbf{B}$ alanı arasındaki farkı vurgulamak için, $\mathbf{B}$ ye çoğu kez *manyetik akı yoğunluğu veya manyetik indüksiyon* denir. Manyetik alan şiddeti $\mathbf{H} = \mathbf{B}_0 / \mu_0 = (\mathbf{B} / \mu_0) - \mathbf{M}$ bağıntısıyla tanımlanan bir vektördür. Böylece, Eşitlik 30.29

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (30.30)$$

biçiminde yazılabilir. $\mathbf{H}$ ve $\mathbf{M}$ niceliklerinin birimleri aynıdır. SI birimlerinde $\mathbf{M}$ birim hacimdeki manyetik moment olduğuna göre, birimi $\text{A} \cdot \text{m}^2 / \text{m}^3$ veya A/m dir.

Bu ifadeleri daha iyi anlayabilmek için I akımı taşıyan bir toroidin içindeki bölgeyi ele alınız. Şayet bu iç bölge bir boşluksa $\mathbf{M} = 0$ ve $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ olur. Bir toroidin içinde $B_0 = \mu_0 nI$ olduğundan (burada n toroidin birim uzunluğundaki sarım sayısıdır), $H = B_0 / \mu_0 = \mu_0 nI / \mu_0$ veya

$$H = nI \quad (30.31)$$

olur. Bu durumda, toroidin içindeki $\mathbf{B}$ manyetik alanı yalnız, sarımlarından geçen akımdan ileri gelmektedir.

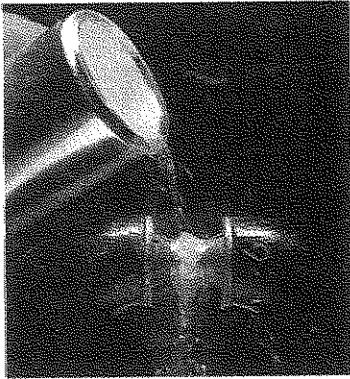
Öte yandan toroidin içi bir tür madde ile doldurulur ve I akımı sabit tutulursa, maddenin içindeki $\mathbf{H}$, nI büyüklüğünü koruyarak *değişmeden* kalır (çünkü yalnız akıma bağlıdır). Ancak, toplam $\mathbf{B}$ alanı madde konulduğu zaman değişir. Eşitlik 30.30 a göre $\mathbf{B}$ nin bir kısmının toroiddeki akımdan ileri gelen $\mu_0 \mathbf{H}$ teriminden; ikinci kısmının ise maddenin mıknatıslanmasından ileri gelen $\mu_0 \mathbf{M}$ teriminden kaynaklandığını görürüz.

Manyetik Maddelerin Sınıflandırılması

Manyetik özelliklerine bağlı olarak maddeler başlıca üç sınıfa ayrılabilir. **Paramanyetik** ve **ferromanyetik** maddeler, sürekli (daimi) manyetik dipol momente sahip atomlardan oluşur. **Diyamanyetik** maddeler ise sürekli manyetik momente sahip olmayan atomlardan oluşur.

Paramanyetik ve diyamanyetik maddelerin mıknatıslanma vektörleri $\mathbf{M}$, manyetik alan şiddeti $\mathbf{H}$ ile orantılıdır. Yani bir dış manyetik alan içerisine yerleştirilen bu maddeler için,

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (30.32)$$



Bir paramanyetik madde olan oksijen, manyetik alana doğru çekilir. Bu fotoğraftaki sıvı oksijen, mıknatısın kutupları arasında asılı durur (Leon Lewandowski).

TABLO 30.2 Bazı Paramanyetik ve Diyamanyetik Maddelerin 300 K'deki Manyetik Duygunlukları

Paramanyetik Madde	χ	Diyamanyetik Madde	χ
Alüminyum	$2,3 \times 10^{-5}$	Bismut	$-1,66 \times 10^{-5}$
Kalsiyum	$1,9 \times 10^{-5}$	Bakır	$-9,8 \times 10^{-6}$
Krom	$2,7 \times 10^{-4}$	Elmas	$-2,2 \times 10^{-5}$
Lityum	$2,1 \times 10^{-5}$	Altın	$-3,6 \times 10^{-5}$
Magnezyum	$1,2 \times 10^{-5}$	Kurşun	$-1,7 \times 10^{-5}$
Nayobiyum	$2,6 \times 10^{-4}$	Civa	$-2,9 \times 10^{-5}$
Oksijen	$2,1 \times 10^{-6}$	Azot	$-5,0 \times 10^{-9}$
Platin	$2,9 \times 10^{-4}$	Gümüş	$-2,6 \times 10^{-5}$
Tungsten	$6,8 \times 10^{-5}$	Silisyum	$-4,2 \times 10^{-6}$

yazabiliriz. Burada χ manyetik duyguluk (süseptibilite) denen boyutsuz (birimsiz) bir çarpandır. Şayet madde paramanyetikse, χ pozitif olup bu durumda $\mathbf{M}$, $\mathbf{H}$ ile aynı yöndedir. Madde diyamanyetik ise, χ negatif olup $\mathbf{M}$, $\mathbf{H}$ 'ye ters yöndedir. Bu lineer bağımlılığın ferromanyetik maddeler için geçerli olmadığına dikkat etmek son derece önemlidir. Bazı maddelerin duygulukları Tablo 30.2 de verilmiştir.

Manyetik duyguluk χ

Eşitlik 30.32 ile verilen $\mathbf{M}$ 'yi Eşitlik 30.30 da yerine koyarak;

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(\mathbf{H} + \chi\mathbf{H}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$$

ya da

$$\mathbf{B} = \mu_m \mathbf{H} \quad (30.33)$$

elde edilir. Buradaki μ_m sabitine maddenin manyetik geçirgenliği denir ve duyguluğa

$$\mu_m = \mu_0(1 + \chi) \quad (30.34)$$

Manyetik geçirgenlik μ_m

bağıntısı ile bağlıdır. Maddeler, μ_m ve μ_0 'nın (serbest uzayın geçirgenliği) büyüklüğüne bağlı olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

Paramanyetik	$\mu_m > \mu_0$
Diyamanyetik	$\mu_m < \mu_0$

Paramanyetik ve diyamanyetik maddeler için χ çok küçük olduğundan (Tablo 30.2 ye bakınız), bu maddeler için μ_m hemen hemen μ_0 'a eşittir. Ancak, ferromanyetik maddeler için μ_m , μ_0 dan bir kaç bin kere daha büyüktür (bunun anlamı ferromanyetik maddeler için χ nın çok büyük oluşudur).

Eşitlik 30.33, $\mathbf{B}$ ile $\mathbf{H}$ arasında basit bir bağıntı oluşturuyorsa da, ferromanyetik maddelere uygulanmaya çalışıldığında dikkatlice yorumlanmalıdır. Daha önce belirtildiği gibi, ferromanyetik maddelerde $\mathbf{M}$, $\mathbf{H}$ nin lineer bir fonksiyonu değildir. Böyle olmasının nedeni, μ_m nin değerinin yalnız ferromanyetik maddenin bir karakteristiği olmakla kalmayıp aynı zamanda önceki duruma ve önceki durumundan şimdiki durumuna gelinceye kadar geçirdiği işlemlere de bağlı olmasıdır.

ÖRNEK 30.10 Demirle Doldurulmuş Bir Toroid

5A'lık akım taşıyan toroid şeklindeki bir sargının birim uzunluğunda 60 sarım vardır. Çekirdeği demir olup geçirgenliği, verilen koşullar altında, $\mu_m = 5000\mu_0$ olduğuna göre demirin içindeki H ve B 'yi bulunuz.

Çözüm Eşitlik 30.31 ve Eşitlik 30.33 ü kullanarak

$$H = nI = \left(60,0 \frac{\text{sarım}}{\text{m}}\right)(5,00 \text{ A}) = \frac{300 \text{ A} \cdot \text{sarım}}{\text{m}}$$

$$B = \mu_m H = 5000 \mu_0 H$$

$$= 5000 \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}\right) \left(300 \frac{\text{A} \cdot \text{sarım}}{\text{m}}\right) = 1,88 \text{ T}$$

B 'nin bu değeri, demir çekirdek bulunmadığı zamanki değerden 5000 kez daha büyüktür.

Alıştırma Demir çekirdeğin içindeki mıknatıslanma vektörünün büyüklüğünü bulunuz.

Cevap $M = 1,5 \times 10^6 \text{ A/m}$

Sinama Sorusu 30.7

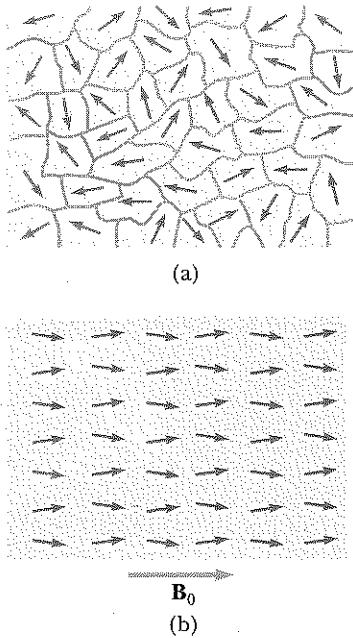
İç bölgesinde hava bulunan bir solenoiddeki akım, bir $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ manyetik alanı oluşturur. Solenoidin içine (a) alüminyum, (b) bakır ve (c) demir yerleştirilirse $\mathbf{B}$ nin büyüklüğünün nasıl değişeceğini nitel olarak betimleyiniz.

Ferromanyetizma

Atomları sürekli manyetik momente sahip olan az sayıda kristal yapılu madde, **ferromanyetizma** denen kuvvetli manyetik olaylar gösterirler. Ferromanyetik maddelerin bazı örnekleri demir, kobalt, nikel, gadolinyum ve disprosyumdur. Bu tür maddeler, zayıf bir dış manyetik alan içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan atomik manyetik dipol momentler içerirler. Momentler bir kere paralel hale getirildikten sonra, dış alan ortamdaki kaldırılabilir bile madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu sürekli yönelim, komşu olan manyetik momentler arasındaki kuvvetli bir etkileşimden kaynaklanır. Bu etkileşim, ancak kuantum mekaniksel ifadelerle anlaşılabilir.

Tüm ferromanyetik maddeler "**domain**" denen mikroskobik bölgelerden oluşurlar. Herhangi bir bölgedeki momentlerin hepsi aynı yönde yönelmişlerdir. Bu bölgelerin hacimleri yaklaşık $10^{-12} - 10^{-8} \text{ m}^3$ olup $10^{17} - 10^{21}$ civarında atom içermektedirler. Farklı yönelimlere sahip olan bölgelerin arasındaki sınırlara **bölge duvarları** denir. Mıknatıslanmamış bir numunede, Şekil 30.28a da gösterildiği gibi bölgeler, net manyetik moment sıfır olacak biçimde rastgele yönelirler. Numune bir dış manyetik alan içine konduğu zaman, bölgeler hafifce dönerek alan yönünde yönelmeye çalışırlar. Bu yönelme olayı, Şekil 30.28b deki gibi mıknatıslanmış bir numune ortaya çıkarır. Gözlemler, dış alanı uygulayınca başlangıçta dış alan yönünde yönelmiş durumda olan bölgelerin diğer yönlerde yönelmiş olanların aleyhine büyüyeceğini göstermektedir. Dış alan ortamdaki kaldırıldığı zaman, numune kalkan alanın yönünde net bir mıknatıslanmayı koruyabilir. Normal sıcaklıklarda, ısısal uyarımlar manyetik momentlerin bu tercihli yönelimini bozacak kadar etkili değildir.

Ferromanyetik bir maddenin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan tipik bir deneysel düzenek, Şekil 30.29 da olduğu gibi, N tane sarım teli bulunan toroid-biçimli bir numuneden oluşur. Burada sarımlar siyah renkte çizilmiş olup birinci kangal adını alır. Bu ağıta bazen **Rowland halkası** da denir. Toroidin içinden geçen manyetik akıyı ölçmek için bir galvanometreye bağlanmış bir **ikinci kangal** kullanılır. Toroidin çekirdeğindeki manyetik alan $\mathbf{B}$, toroid akımını sıfırdan I değerine kadar arttırarak ölçülür. Akım değişince



Şekil 30.28 (a) Mıknatıslanmamış bir maddede atomik manyetik dipollerin rastgele yönelişleri. (b) Bir $\mathbf{B}_0$ dış alanı uygulandığında, atomik manyetik dipollerin alan yönünde yönelmeye çalışmaları ve böylece maddeye net bir $\mathbf{M}$ mıknatıslanması kazandırılması.

İkincil kangaldan geçen akı BA kadar değişir (burada A toroidin kesit alanıdır). Kesim 31 de göreceğimiz gibi, bu değişen akı nedeniyle ikincil kangalda manyetik akının zamana göre değişim hızı ile orantılı bir emk oluşur. Şayet ikincil devredeki galvanometre uygun bir biçimde kalibre edilirse, birinci kangaldaki akımın herhangi bir değerine karşılık gelen B için bir değer elde edilebilir. Değişik akımlar için manyetik alan B nin önce boş toroid kangalındaki sonra da aynı kangal manyetik madde ile doldurulduktan sonraki değerleri ölçülür. Böylece, iki ölçüm karşılaştırılarak maddenin manyetik özellikleri elde edilir.

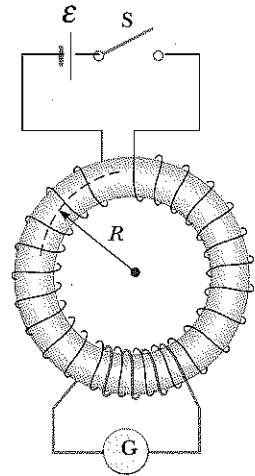
Şimdi çekirdeği mıknatıslanmamış demirden oluşan toroid şeklinde bir kangal ele alalım. Sarımlardaki akım sıfırdan bir I değerine artırılırsa, $H = nI$ ifadesine göre alan şiddeti H , I akımı ile lineer olarak artar. Ayrıca, Şekil 30.30 da 0 dan a ya kadarki eğrinin gösterdiği gibi, B toplam alanı da akım arttıkça artar. 0 noktasında demirin manyetik bölgeler rastgele yönelmişlerdir. Bu da $B_m = 0$ 'a karşılık gelir. Birinci kangaldaki artan akım dış alan B_0 ı arttırdıkça bölgeler alanla daha çok paralel hale gelirler ve sonunda a noktasında hemen hemen hepsi paralel duruma geçerler. Bu noktada, demir çekirdek *doyma* yaklaşmaktadır. (Doyma hali, tüm bölgelerin aynı yöne yöneldikleri durumdur.)

Bundan sonra akımın sıfıra düşürüldüğünü ve böylece dış alanın ortamdandan kaldırıldığını düşünelim. **Mıknatıslanma eğrisi** denilen B 'nin H ile değişim eğrisi, şimdi, Şekil 30.30 da gösterilen ab yolunu izler. b noktasında dış alan $B_0 = 0$ olduğu halde, B alanının sıfır olmadığına dikkat ediniz. Bunun nedeni, çok sayıda bölgenin paralel hale geçmelerinden ötürü, şimdi, demir çekirdeğin mıknatıslanmış oluşudur (yani, $B = B_m$ dir). Bu durum, demirin **kalıcı mıknatıslanmaya** sahip olduğunu gösterir. Birincildeki akımın yönü değiştirilerek dış alanın yönü değiştirilip şiddeti artırılırsa, numune c noktasında tekrar mıknatıslanmamış duruma geçinceye kadar bölgeler yön değiştirirler; burada $B = 0$ olur. Ters yönlü akımdaki daha fazla artış demirin ters yönde mıknatıslanmasına neden olur ve d noktasında doyma yaklaşır. Akım tekrar sıfıra düşürülüp ve sonra başlangıçtaki (pozitif) yönde artırılırsa benzer olaylar zinciri oluşur ve mıknatıslanma eğrisi def yolunu izler. Akım yeterince artırılırsa, mıknatıslanma eğrisi a noktasına geri döner ve orada numune yine maksimum mıknatıslanma değerine kavuşur.

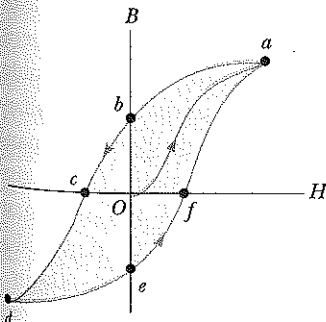
Anlatılan bu olaya **manyetik "hysteresis"** denir. Manyetik hysteresis, ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının uygulanan alanın şiddetine olduğu kadar maddenin geçmişteki durumuna da bağlı olduğunu gösterir. (*Hysteresis* kelimesinin gerçek anlamı "geride kalış" dır.) Çoğu kez ferromanyetik bir maddenin "belleğe" sahip olduğu söylenir. Çünkü dış alan ortadan kaldırıldıktan sonra, madde mıknatıslanmış olarak kalır. Şekil 30.31 deki kapalı ilmeğe bir hysteresis ilmek denir. Şekli ve büyüklüğü ferromanyetik maddenin

Ev Deneyi

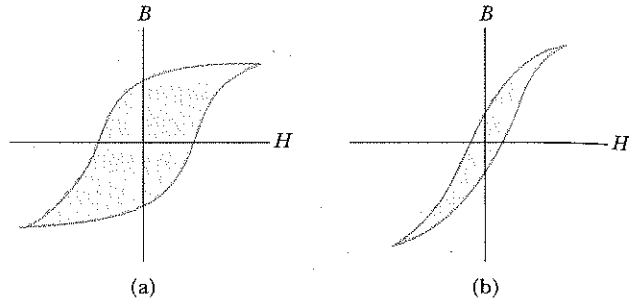
Bu deneyi önceden yapmış olabilirsiniz. Bir çiviye bir çubuk mıknatısa bir kaç kez sürterek mıknatıslayın. Çivinin mıknatıslanmasının büyüklüğünü çevreden topladığı kağıt parçaları ve tutturucularla test edebilirsiniz. Şimdi çiviye çekiçle birkaç defa vurduktan sonra yeniden mıknatıslanmayı test edin. Çivi çelikte "bölge" açısından neler olduğunu açıklayın.



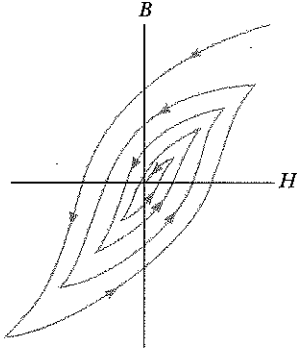
Şekil 30.29 Bir maddenin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan toroid şeklindeki bir sargı düzeni kesiti. Araştırılacak madde toroidin içine doldurulur ve galvanometrenin bağlı olduğu ikinci devre ile manyetik akı ölçülür.



Şekil 30.30 Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanma ya da hysteresis eğrisi



Şekil 30.31 (a) Sert bir ferromanyetik maddenin ve (b) yumuşak bir ferromanyetik maddenin hysteresis ilmekleri.



Şekil 30.32 Ferromanyetik bir maddeyi peşpeşe hysteresis ilmeklerden geçirerek mıknatıslığını ortadan kaldırma işlemi.

özelliklerine ve uygulanan maksimum alanın şiddetine bağlıdır. “Sert” ferromanyetik maddelerin hysteresis ilmekleri Şekil 30.31a daki gibi geniştir. Bu tür maddelerin büyük bir kalıcı mıknatıslanmaları var demektir. Bu mıknatıslanma bir dış alanla kolaylıkla ortadan kaldırılamaz. Demir gibi “yumuşak” ferromanyetik maddelerin dar bir hysteresis ilmeği ve buna karşılık gelen küçük bir kalıcı mıknatıslanması vardır (Şek. 30.31b). Böyle maddeler kolaylıkla mıknatıslanır ve mıknatıslıkları kolaylıkla kaldırılabilir. İdeal bir yumuşak ferromanyet olsaydı hiç hysteresis gösteremeyecek ve böylece hiç kalıcı mıknatıslanması olmayacaktı. Ferromanyetik bir maddenin, Şekil 30.32 de görüldüğü gibi uygulanan alanı yavaş yavaş azaltarak, peşpeşe hysteresis ilmeklerden geçirmek suretiyle mıknatıslığını ortadan kaldırabiliriz.

Sinama Sorusu 30.8

Hysteresis ilmeği Şekil 30.31a ya benzeyen madde mi yoksa Şekil 30.31b ye benzeyen madde mi daha iyi sürekli (daimi) mıknatıs yapımına elverişlidir?

Mıknatıslanma eğrisi başka bir nedenden ötürü de kullanışlıdır. **Mıknatıslanma eğrisinin içinde kalan alan, maddeyi hysteresis döngüsünden geçirmek için gereken işi temsil eder.** Mıknatıslanma sürecinde maddenin kazandığı enerji, dış alanın kaynağından (Yani toroidin devresindeki emk'den) doğar. Mıknatıslanma döngüsü tekrarlandığı zaman, bölgelerin yeniden sıralanışlarından ötürü maddede oluşan kayıp süreçleri manyetik enerjinin iç ısısal enerjiye dönüşmesi ile sonuçlanır. Bu yüzden maddenin sıcaklığı artar. Bu nedenle, değişken alanların etkisindeki aygıtlarda (transformatörler gibi) yumuşak ferromanyetik maddelerden yapılan çekirdekler kullanılır. Bunların hysteresis ilmekleri dar ve dolayısı ile döngü başına enerji kayıpları çok küçüktür.



Manyetik bilgisayar diskleri, bir ince tabaka halindeki ferromanyetik maddenin bir parçasında **B** nin yönünü değiştirerek bilgileri depolamaya yarar. “Floppy” diskler, tabakanın bir dairesel plastik yaprak üzerine yerleştirilmesiyle elde edilir. “Hard disk”ler, her iki tarafında da manyetik kaplama olan bir çok sert tabakadan oluşur. Ses ve görüntü kayıt teypleri, floppy disklerle aynı ilkeye dayanır fakat burada ferromanyetik madde oldukça uzun plastik şerit üzerine yayılmıştır. Bir kafadaki oldukça küçük tel kangallar, hızlı bir şekilde kafanın önünden geçen manyetik maddeye yakın bir konumdadır. Kangallardan geçen akımları değiştirmek, kaydetme maddesini mıknatıslayan bir manyetik alan oluşturur. Bilgileri geri almak için mıknatıslanan madde bir okuma (playback) kangalının önünden geçirilir. Maddenin değişen manyetizması kangalda Bölüm 32 de tartışacağımız gibi, bir akım oluşturur. Bu akım daha sonra, ses veya görüntü aygıtı ile yükseltilir ya da bilgisayar devresi ile işlenir.

Paramanyetizma

Paramanyetik maddeler pozitif fakat küçük bir manyetik duygunluğa sahiptir ($0 < \chi \ll 1$). Bu duygunluk, *sürekli* manyetik dipol momenti olan atomların (ya da iyonların) varlığından kaynaklanır. Bu momentler birbirleri ile yalnız çok zayıf etkileşimde bulunurlar ve bir dış manyetik alan içerisinde bulunmadıkları zaman gelişigüzel yönelmişlerdir. Madde bir dış manyetik alan içerisine konulduğu zaman, atomik momentleri alan yönünde yönelmeye zorlanırlar. Ancak bu yönelim süreci, momentleri rastgele yönere yönelmeye çalışan ısısal hareketin etkileri ile yarışmak zorundadır.

Pierre Curie (1859-1906) ve ondan sonra pekçok araştırmacı deneysel olarak bazı koşullar altında, paramanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının manyetik alanla doğru, mutlak sıcaklıkla ise ters orantılı olduğunu buldular:

$$M = C \frac{B_0}{T} \quad (30.35)$$

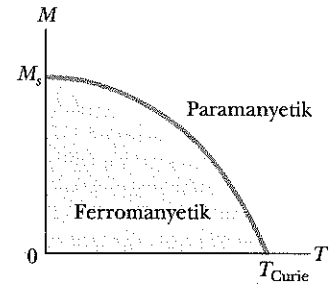
Bu bağıntıya, keşfedenin anısına, **Curie Yasası** ve C sabitine de **Curie sabiti** denir. $B_0 = 0$ olduğunda mıknatıslanma sıfırdır; bu durum dipol momentlerin rastgele yönelmiş olmalarına karşılık gelir. Bağıntı, mıknatıslanmanın artan alanla ve azalan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Çok yüksek alanlarda veya çok düşük sıcaklıklarda, mıknatıslanma maksimum veya doyum değerine yaklaşır. Bu durumda, tüm manyetik dipol momentler uygulanan alan yönünde dizilmişler demektir ve 30.35 Eşitliği artık geçerli değildir.

Ferromanyetik bir madde, sıcaklığı **Curie sıcaklığı** denen bir kritik sıcaklığa ulaştığı ya da geçtiği zaman kalıcı mıknatıslanmasını kaybeder ve paramanyetik duruma geçer (Şekil 30.33'e bakınız). Curie sıcaklığının altında, manyetik momentler paralel olarak dizildikleri için madde ferromanyettir. Curie sıcaklığının üstünde, ısısal enerji, momentlerin gelişigüzel yönelmelerine neden olacak kadar yüksektir; bu yüzden madde paramanyetik olur. Bazı ferromanyetik maddelerin Curie sıcaklıklarının bir listesi Tablo 30.3'de verilmiştir.

Diyamanyetizma

Diyamanyetik bir maddeye bir dış manyetik alan uygulandığında, bu alana zıt yönde zayıf bir manyetik moment oluşur. Bu diyamanyetik maddelerin bir mıknatıs tarafından zayıfça itilmesine neden olur. Her çeşit maddede diyamanyetizma olmakla birlikte etkileri paramanyetizma ya da ferromanyetizmaya göre daha zayıftır ve ancak diğer etkiler olmadığı zaman gözlenebilirler.

Çekirdeğinin etrafında zıt yönlerde fakat aynı süratle dolanan iki elektronlu klasik atom modelini düşünerek diyamanyetizmayı bir ölçüde anlayabiliriz. Elektronlar, pozitif yüklü çekirdeğin oluşturduğu çekici elektrostatik kuvvet nedeniyle çembersel yörüngelerde dolanırlar. İki elektronun manyetik momentlerinin büyüklükleri eşit fakat yönleri zıt olduğundan birbirlerini yok ederler ve atomun manyetik momenti sıfır olur. Bir dış manyetik alan uygulandığı zaman elektronlar $\mathbf{q}\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ile verilen ek bir kuvvet hissederler. Bu ek kuvvet nedeniyle elektronların gördüğü merkezci kuvvetler artık eşit değildir. Manyetik momenti alana antiparalel olan elektronun yörüngesel süratı artarken, paralel olan elektronun süratı azalır. Sonuçta, elektronların manyetik momentleri birbirlerini yok edemezler ve madde uygulanan manyetik alana zıt yönde net bir manyetik moment edinir.



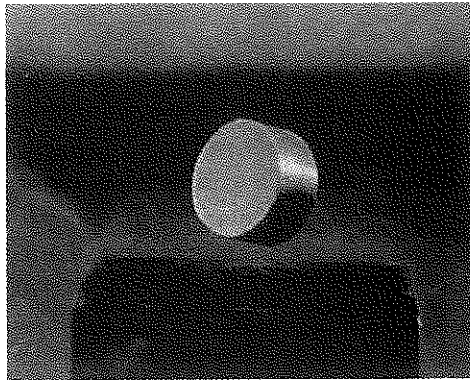
Şekil 30.33 Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının mutlak sıcaklıkla değişimi. T_c ile gösterilen Curie sıcaklığının altında manyetik momentler aynı yönde dizilirler (sıralanırlar). Bu bölgede madde ferromanyetik olur. Buna karşın T_c 'nin üstünde ise paramanyettir (sıralanmamış).

TABLO 30.3 Bazı Ferromanyetik Maddelerin Curie Sıcaklıkları

Madde	T_c (K)
Demir	1043
Kobalt	1394
Nikel	631
Gaolinyum	317
Fe_2O_3	893

web

üzüm tanelerini mıknatısların ittiğini gösteren bir deney için www.exploratorium.edu/snacks/diamagnetism www/index.html sitesine giriniz.



Şekil 30.34 Sıvı azot sıcaklığına kadar soğutulmuş, süper iletken duruma geçirilmiş $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ den oluşan bir diskin üstünde sıvı azot sıcaklığında (77 K) havada askıda kalan küçük bir daimi mıknatıs (ABD Enerji Bakanlığı Fen Kaynakları Fotoğraf Araştırmaları Kurumu)

web

Süperiletkenlerin olağandışı özelliklerinin bir daha ayrıntılı betimlemesi için www.saunderscollege.com/physics/sitesine.giriniz

Bölüm 27 den anımsayacağınız gibi, süperiletkenler maddeden maddeye değişen kritik sıcaklıkların altındaki sıcaklıklarda dc direnci *sıfır* olan maddelerdir. Süperiletkenlerin bazı tipleri, süperiletken duruma geçtiklerinde mükemmel bir diyamanyetizma da gösterirler. Sonuçta, süperiletken içindeki manyetik alanı, sıfır yapacak şekilde uygulanan bir alanı dışarı atar. Bu akıyı dışarı atma olayına **Meissner olayı** denir. Sürekli bir mıknatıs, bir süperiletkenle yaklaştırılırsa iki madde birbirlerini iter. Bu durum Şekil 30.34'te görülmektedir. Bu resim sürekli bir küçük mıknatısın 77 K de tutulan bir süperiletkenin üstünde asılı kaldığını göstermektedir.

ÖRNEK 30.11 Doyum Mıknatıslanması

Atom başına birtek çiftlenmemiş elektron spini olduğunu varsayarak uzun bir demir silindirin doyum mıknatıslanmasını bulunuz.

Çözüm Doyum mıknatıslanması, numunedeki manyetik momentlerin tümü aynı yönde dizildikleri zaman elde edilir. Numunenin birim hacminde n tane atom varsa, doyum mıknatıslanması M_d 'nin değeri,

$$M_d = n\mu$$

olur. Burada μ atomlardan birinin manyetik momentidir. Demirin molekül ağırlığı 55 g/mol ve yoğunluğu 7,9 g/cm³ olduğundan n 'nin değeri $8,6 \times 10^{28}$ atom/m³ dür.

Manyetik momente her atomun bir Bohr mığnetonu (çiftlenmemiş olan spinden ötürü) kadar katkıda bulunduğunu varsayarak,

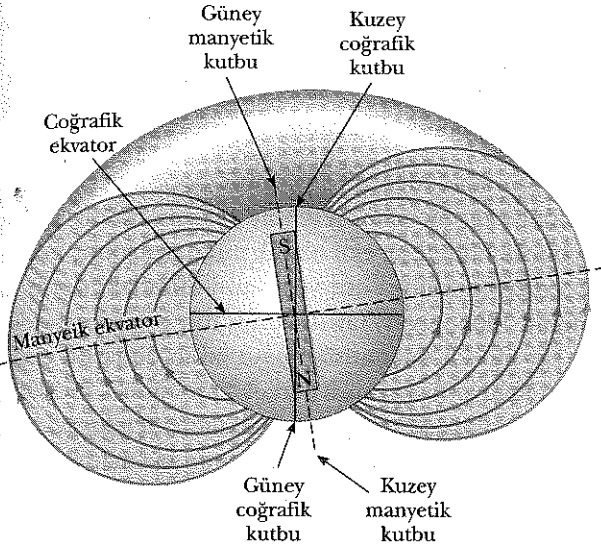
$$M_d = \left(8,6 \times 10^{28} \frac{\text{atom}}{\text{m}^3} \right) \left(9,27 \times 10^{-24} \frac{\text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{atom}} \right) = 8,0 \times 10^5 \text{ A/m}$$

elde ederiz. Bu değer, tavllanmış demirin deneysel olarak bulunan doyum mıknatıslanmasının yaklaşık olarak yarısına eşittir. Bu durum gerçekte, atom başına iki tane çiftlenmemiş elektron spini olduğunu göstermektedir.

Seçmeli Kesim

30.9 YERİN MANYETİK ALANI

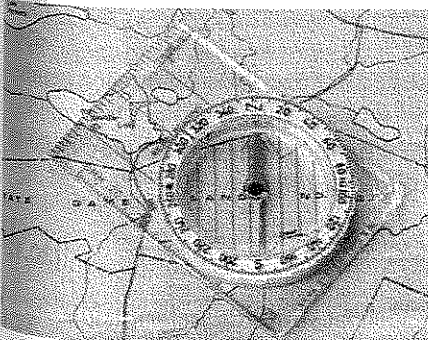
Bir pusula mıknatısının, bir kuzey, bir de güney kutbu var demek yerine, bir "kuzeyi gösteren" bir de "güneyi gösteren" kutbu var demek daha doğrudur. Bununla mıknatısın bir kutbunun yerin kuzey coğrafik kutbunu aradığını ya da işaret ettiğini kastediyoruz. Bir mıknatısın kuzey kutbu Dünya'nın kuzey coğrafik kutbuna doğru çekildiğinden Dünya'nın **kuzey manyetik kutbunun güney coğrafik kutbunun yakınına ve güney manyetik kutbunun ise kuzey coğrafik kutbunun yakına yerleşmiş olduğu** sonucuna varırız. Gerçekte, Şekil 30.35'te resimlendirildiği gibi Yer'in manyetik alanının şekillenimi, bir çok büyük çubuk mıknatısı Yer'in iç bölgesinde derine gömerek elde edilebilecek sonuca oldukça benzemektedir.



Şekil 30.35 Yer'in manyetik alan çizgileri. Dünya'nın güney manyetik kutbunu ve kuzey coğrafik kutbuna, kuzey manyetik kutbunun ise güney coğrafik kutbuna yakın olduğuna dikkat ediniz.

Bir pusula iğnesi yatay düzlemde olduğu kadar düşey düzlemde de dönebilecek biçimde asılırsa, iğne yalnız ekvatora yakın yerlerde yer yüzüne paraleldir. Kuzeye doğru götürüldükçe iğne gittikçe Dünya yüzeyini gösterecek biçimde döner. Sonuçta, Kanada'da Hudson Körfezinin hemen kuzeyindeki bir noktada, iğnenin kuzey kutbu tam aşağı doğru yönelir. İlk kez 1832 de bulunan bu yer, Dünya'nın güney manyetik kutbunun bulunduğu konum olarak düşünülmektedir. Bu, Dünya'nın coğrafik kuzey kutbundan yaklaşık 1300 mil uzakta olup tam konumu zamanla çok az değişmektedir. Benzer şekilde, Dünyanın kuzey manyetik kutbu güney coğrafik kutbundan yaklaşık 1200 mil uzaktır.

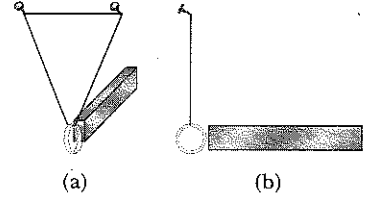
Bu yüzden bir pusula iğnesinin kuzeyi gösterdiğini söylemek ancak yaklaşık olarak doğrudur. Coğrafik Kuzey kutup olarak tanımlanan gerçek kuzey ile bir pusulanın gösterdiği kuzey arasındaki fark, Dünya üzerindeki noktadan noktaya değişir. Bu farka *manyetik sapma* denir. Örneğin Florida'dan Büyük Göllere (Great Lakes) kadar uzanan hat boyunca bir pusula gerçek kuzeyi gösterir, buna karşın Washington'da gerçek kuzeyin 25° doğusuna doğru yönelir.



Bir pusula iğnesinin kuzey ucu, Dünya'nın güney manyetik kutbunu gösterir. Dünya üzerindeki bir noktada pusulanın gösterdiği "kuzey" yön, o noktadaki manyetik sapmaya bağlı olarak gerçek coğrafik kuzeyden ayrılır. (George Semple)

Ev Deneyi

Altın yüzük bir mıknatıs tarafından çok zayıfça itilir. Bunu görmek için 14 yada 18 ayar bir yüzüğü (a)'da görüldüğü gibi uzun bir iple as. Sahnım yapur ve periyodunu yaklaşık bul. Şimdi yüzüğü durdur ve hareket etmemesini sağla. Daha sonra kuvvetli bir mıknatısı (b)'deki gibi hızla yüzüğe yaklaştır, fakat ona çarpırmamaya dikkat et. Sonra mıknatısı uzaklaştır. Daha önce bulduğunuz salınım periyodunuza uygun şekilde hareketi tekrarlayın. Bu tam olarak sahnıcağa sallanan çocuğu itmeye benzer. Rezonans frekansında küçük bir kuvvet uyguladığınızda büyük genlikler oluşturabilirsiniz. Platin yüzüğünüz var ise, benzer olayı gözleyebilirsiniz. Platin paramagnetik olduğu için mıknatıs tarafından zayıfça çekilir.



Sinama Sorusu 30.9

Dünya'nın çevresine ekvator boyunca çok büyük bir akım ilmeği sararak Dünya'nın (Yer'in) manyetik alanını sıfırlamak isteseydik akımın doğudan batıya doğru mu yoksa batıdan doğuya doğru mu akması gerekirdi?

Dünyanın manyetik alan deseni dünyanın derinliklerindeki bir çubuk mıknatısın oluşturabileceği bir alan desenine benziyorsa da, Dünya'nın alan kaynağının, niçin büyük kütleli sürekli olarak mıknatıslanmış maddeler olmayacağını anlamak kolaydır. Dünya'nın yüzeyinin altındaki derin tabakalarda büyük miktarda demir filizi vardır, fakat Dünya'nın çekirdeğindeki yüksek sıcaklık bu demirin bir sürekli mıknatıslanmaya sahip olmasını engeller. Bilim adamları, Dünya'nın manyetik alanının gerçek kaynağının, merkezindeki yük taşıyan konveksiyon akımları olduğunu sanmaktadır. İçteki sıvıda dönen yüklü iyonlar ya da elektronlar, bir tel ilmekteki akımın bir manyetik alan oluşturması gibi, bir manyetik alan oluşturabilirler. Bir gezegenin manyetik alan şiddetinin dönme hızına bağlı olduğunu belirten kuvvetli deliller de vardır. Örneğin Jupiter, Dünya'dan daha hızlı döner ve son zamanlardaki uzay araştırmaları Jupiter'in manyetik alanının Dünya'ninkinden daha kuvvetli olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan Venüs, Dünya'dan daha yavaş döner ve manyetik alanının daha zayıf olduğu bulunmuştur. Dünya'nın manyetizmasının nedenleri hakkındaki araştırmalar devam etmektedir.

Dünyanın manyetik alanı ile ilgili ilginç bir rastlantı da son bir milyon yıl içerisinde manyetik alanın bir çok kere yön değiştirdiğinin tesbitidir. Bunun için gerekli kanıtı bazalt (demir içeren bir çeşit taş) vermektedir. Bazalt, okyanus tabanındaki volkanik fışkırmalarla ortaya çıkar. Lavlar soğurken o katlaşırlar ve Dünya'nın manyetik alan yönünün bir resmini muhafaza eder. Taşların başka yöntemlerle yaşları belirlenerek manyetik alanın bu periyodik olarak yön değiştirmesini ortaya koyan zamansal süreç elde edilmiş olur.

ÖZET

Biot-Savart yasası, kararlı bir I akımı taşıyan bir ds uzunluk elemanının bir P noktasında oluşturduğu $d\mathbf{B}$ manyetik alanının

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (30.1)$$

ile verildiğini belirtir. Burada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ serbest uzayın geçirgenliği r , ds elemanı ile P noktası arasındaki uzaklık ve $\hat{\mathbf{r}}$, ds den P noktasını gösteren bir birim vektördür. P deki toplam alanı bulmak için bu vektörel ifadenin akım dağılımının tamamı üzerinden integralini almamız gerekir.

I akımı taşıyan uzun, doğrusal bir telden a kadar uzaklıktaki bir noktada oluşan **manyetik alan**

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (30.5)$$

bağıntısı ile verilir. Alan çizgileri, merkezleri tel üzerinde olan iç-içe çemberler biçimindedir.

I_1 ve I_2 akımları taşıyan ve aralarında a uzaklığı bulunan iki paralel iletkenin birbirlerine uyguladıkları birim uzunluk başına kuvvet,

$$\frac{F_B}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (30.12)$$

dir. Kuvvet, akımlar aynı yönde iseler çekici, zıt yönlerde iseler iticidir.

Ampère yasası, kapalı herhangi bir yol boyunca $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ nin çizgi integralinin $\mu_0 I$ ya eşit olduğunu söyler. Burada I kapalı yolun çevrelediği herhangi bir yüzeyden geçen net toplam kararlı akımdır:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \quad (30.13)$$

Ampère yasası kullanılarak bir toroidin ve bir solenoidin içindeki alanların değeri

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (\text{toroid}) \quad (30.16)$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu_0 n I \quad (\text{solenoid}) \quad (30.17)$$

ile verildiği bulunur. Burada N toplam sarım sayısıdır. Bir yüzeyden geçen manyetik akı Φ_m ,

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (30.18)$$

ile verilen yüzey integrali ile tanımlanır.

Manyetizmanın Gauss yasası, kapalı herhangi bir yüzeyden geçen net manyetik akının sıfır olduğunu belirtir.

Ampère-Maxwell yasası da denen **Ampère yasasının genelleştirilmiş biçimi**,

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (30.22)$$

dir. Bu yasa, manyetik alanların hem iletim akımları, hem de değişken elektrik alanları ile oluşturulabildikleri gerçeğini betimlemektedir.

SORULAR

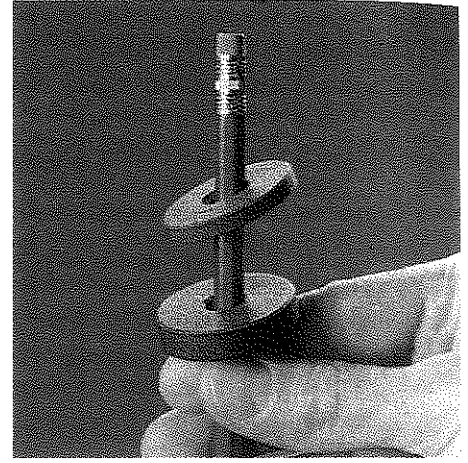
1. Bir akım ilmeğinin oluşturduğu manyetik alan düzgün müdür? Açıklayınız.
2. Akım taşıyan bir iletkenin, etrafında oluşturduğu manyetik alan Biot-Savart yasası kullanılarak hesaplanabilir. Akım, yükün akış hızı olarak tanımlandığına göre durgun yüklerden kaynaklanan manyetik alan hakkında ne sonuca varabilirsiniz? Hareketli yüklerden kaynaklanan hakkında ne diyebilirsiniz?
3. İki paralel telin zıt yönlerde akım taşıdıklarını varsayarak (a) telleri arasında (b) tellerin dışında, telleri içine alan düzlem üzerindeki noktalarda bileşke manyetik alanın özelliğini açıklayınız.
4. Zıt yönlerde akım taşıyan iki paralel telin birbirlerini niçin ittiklerini açıklayınız.
5. Bir devre oluşturulurken, eşit fakat zıt yönlü akımlar taşıyan iki tel yanyana getirilerek birlikte bükülürler. Bu yöntem istenmeyen manyetik alanları niçin azaltır?
6. Bir iletkeni çevreleyen her çeşit kapalı yol için Ampère yasası geçerli midir? Böyle her türlü yol için $\mathbf{B}$ yi hesaplamak niçin yararlı değildir.
7. Ampère yasasını Biot-Savart yasası ile karşılaştırınız. Akım taşıyan bir iletkenin oluşturduğu $\mathbf{B}$ 'yi hesaplamak için hangisi daha geneldir?

8. Toroidin içindeki manyetik alan düzgün müdür? Açıklayınız.
9. Manyetizmadaki Ampère yasası ile elektrostatikteki Gauss yasasının benzerliklerini açıklayınız.
10. İçi boş bakır bir boru, uzunluğu boyunca akım taşımaktadır. Borunun içinde niçin $\mathbf{B} = 0$ dır? Borunun dışında $\mathbf{B}$ sıfır değil midir?
11. Bir solenoidin dışındaki $\mathbf{B}$ niçin sıfırdır? ($\mathbf{B}$ 'nin çizgilerinin kapalı yollar oluşturmak zorunda olduğunu unutma)
12. Kararlı I akımı taşıyan bir solenoidin (a) uzunluğu iki katına çıkarılır, fakat sarım sayısı değiştirilmezse; (b) sarım sayısı iki katına çıkarılır, fakat uzunluğu değiştirilmezse, içindeki manyetik alanın değişimini açıklayınız.
13. Yassı bir iletken ilmek, x -eksenine paralel olan düzgün bir manyetik alana yerleştirilmiştir. İlmeğin hangi yönelimi için yüzeyinden geçen akı maksimum, hangi yönelimi için minimumdur?
14. Ampère yasasının, Maxwell tarafından genelleştirilen biçimindeki yeni kavram nedir?
15. Bir çivinin çevresine çok sayıda tel ilmek sarıldıktan sonra bir pile bağlandığında, $\mathbf{M}$ 'nin, $\mathbf{H}$ 'nin ve $\mathbf{B}$ 'nin kaynaklarını açıklayınız.

16. Bir mıknatıs bir demir parçasını çeker. Bu parça da daha sonra bir başka demir parçasını çekebilir. Manyetik bölgelerin dizilişlerine dayanarak her bir demir parçasında neler oluştuğunu açıklayınız.
17. Manyetik alanı bulunmayan bir gezegene deneme aygıtı çıkmış bir astronot olduğunuzu varsayın. Yanınızda iki tane demir çubuk var; biri mıknatıslanmış öteki ise mıknatıslanmamış olsun. Hangisinin ne olduğunu nasıl belirleyebilirsiniz?
18. Bir mıknatısa bir çekiçe vurmak onun mıknatıslığının azalmasına neden olacaktır. Niçin?
19. Bir çiviği bir mıknatısın kutuplarından herhangi biri çekebilir mi? Mıknatısın yanına getirildiğinde çivinin içinde neler olur? Açıklayınız.
20. Bir Hind hükümdarı bir keresinde kendisinin yerle gök yüzü arasında sonsuza kadar askıda kalabileceği biçiminde, kutuplanışı düzenlenmiş bir manyetik tabuta gömülmesini önermiş. Böyle bir manyetik askı olası mıdır? Tartışınız.
21. Boşlukta niçin $\mathbf{M} = 0$ dir? Boşlukta $\mathbf{B}$ ile $\mathbf{H}$ arasındaki ilişki nedir?
22. Niçin bazı atomlar sürekli manyetik momente sahip ve diğerleri değildir, açıklayın.
23. Bir atomun toplam manyetik momentine hangi faktörler katkıda bulunabilir?
24. Diamanyetik bir maddenin duygunluğu niçin negatiftir?
25. Paramanyetik bir madde de diyamanyetizm etkisi niçin sayılabılır?
26. Ferromanyetik bir madde için Curie sıcaklığının önemini açıklayınız.
27. Ferromanyetik, paramanyetik ve diyamanyetik maddelerin arasındaki farkları tartışınız.
28. Sert ve yumuşak ferromanyetik maddelerin arasındaki fark nedir?
29. Bir bilgisayar diskinin yüzeyi "sert" mi yoksa "yumuşak"

mi bir ferromanyetik maddeden yapılmalıdır?

30. Sürekli mıknatısları yapmak için niçin sert ferromanyetik maddeler kullanmak gerektiğini açıklayınız.
31. Bir mıknatıs bir teyb şeridini çekebilir mi? (Deneyiniz, fakat silinmesini istemediğiniz bir bilginin kaydı olduğu bir şeritle değil!)
32. Sadece kuvvetli bir mıknatıs ve bir tornavida verildiğinde, tornavidayı nasıl mıknatıslayabilir, sonra mıknatışlığını nasıl kaldırabilirsiniz?
33. Şekil Q30.33, merkezlerinde delik olan iki sürekli mıknatısı göstermektedir. Üstteki mıknatısın alttakinin üstünde havada asılı kaldığına dikkat ediniz. (a) Bu nasıl oluşur? (b) Kurşun kalemin görevi nedir? (c) Bu gözlem sonucuna göre mıknatısların kutupları hakkında ne söyleyebilirsiniz? (d) üstteki mıknatıs altüst edilmiş olsaydı, ne olacağını tahmin ediniz.



Şekil Q30.33 İki seramik mıknatıs kullanılarak manyetik askının gösterimi (CENCO'nun izniyle)

PROBLEMLER

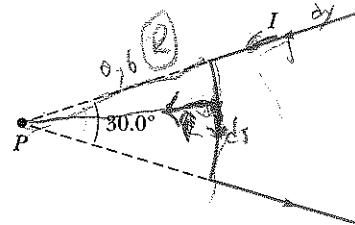
1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; $\square$ = Bu problemin tam çözümü Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir $\square$ = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir

$\square$ = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir $\square$ = Sayısal/sembolik problem çifti

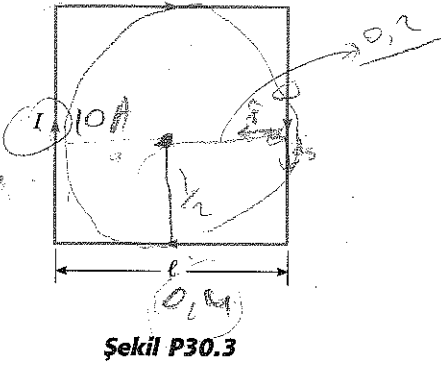
Kesim 30.1 Biot-Savart Yasası

1. Neils Bohr'un 1913 de önerdiği hidrojen atomu modelinde bir elektron, protonun etrafında $5,3 \times 10^{-11}$ m yarıçaplı bir çembersel yörüngede $2,2 \times 10^6$ m/s süratla dolandır. Elektronun hareketinin, protonun bulunduğu konumda oluşturduğu manyetik alanın şiddetini bulunuz.
2. Şekil P30.2 de gösterildiği gibi biçimlendirilen bir akım yolu, yayın merkezi olan P noktasında bir manyetik alan oluşturur. P den yayı gören açı $30,0^\circ$, yay yarıçapı 0,600 m ve akım 3,00 A ise P de oluşturulan alanın büyüklüğü ve yönü nedir?
3. (a) Kenar uzunluğu $\ell = 0,4$ m olan kare biçimli bir iletken ilmekten $I = 10$ A şiddetinde akım geçmektedir (Şekil P30.3). Karenin merkezinde oluşan manye-



Şekil P30.2

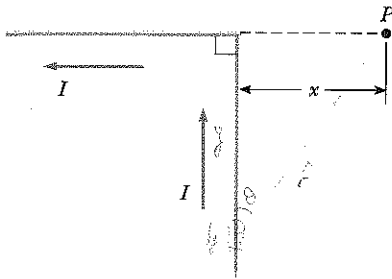
tik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz. (b) Eğer bu iletken bir çember haline getirilir ve aynı akım geçirilirse merkezindeki manyetik alanın değeri ne olur?



Şekil P30.3

4. 1 A şiddetinde akım taşıyan uzun ve ince bir iletken den 100 cm uzaklıktaki bir noktada manyetik alanın büyüklüğünü hesaplayınız.

Şekil P30.5'te gösterildiği biçimde dik açıyla bükülen sonsuz uzunlukta bir telin köşesinden x uzaklıktaki bir P noktasında manyetik alan nedir? Tel kararlı bir I akımı taşımaktadır.



Şekil P30.5

5. 5 A'lık akım taşıyan bir telden bir sarımlı çember şeklinde ilmek yapılması istenmektedir. Manyetik alanın ilmeğin merkezindeki değeri $10 \mu\text{T}$ olduğuna göre ilmeğin yarıçapı ne olmalıdır?

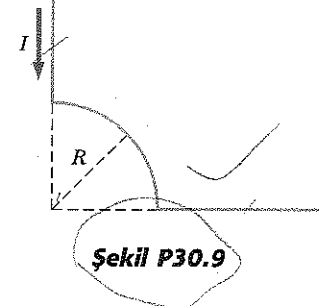
Bir iletken, Şekil P30.7 de gösterilen gibi, yarıçapı $R = 0,100 \text{ m}$ olan bir çembersel ilmekle iki dümdüz, uzun kesimden oluşmuş. Tel, kağıt düzleminde yatmakta ve $I = 7,00 \text{ A}$ 'lık bir akım taşımaktadır. İlmeğin merkezindeki manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

Bir iletken, Şekil P30.7 de gösterilen gibi, yarıçapı R olan bir çembersel ilmekle iki dümdüz, uzun kesimden oluşmuş. Tel kağıt düzleminde yatmakta ve bir I akımı taşımaktadır. İlmeğin merkezindeki manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

Şekil P30.9 daki tel parçası $I = 5,00 \text{ A}$ 'lık bir akım taşımaktadır. Çembersel yayın yarıçapı $R = 3,00 \text{ cm}$ olduğuna göre başlangıç noktasındaki manyetik alanın yönünü ve büyüklüğünü bulunuz.

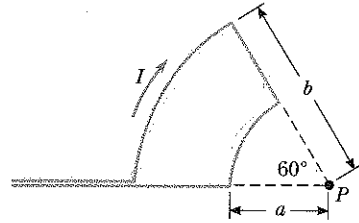


Şekil P30.7 Problem 7 ve 8



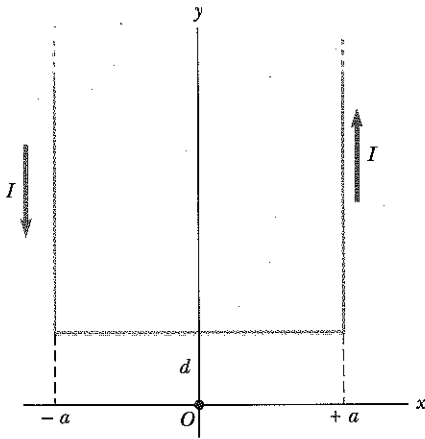
Şekil P30.9

10. I akımı taşıyan R yarıçaplı bir yassı çembersel akım ilmeği düşünün. Başlangıç ilmeğin merkezinde olmak üzere x eksenini ilmeğin eksenini boyunca alınız. x koordinatındaki manyetik alanın büyüklüğünün başlangıçtaki değere oranının grafiğini $x = 0$ ile $x = 5R$ aralığında çizin. Bu problemi çözmek için programlanabilir bir hesap makinası veya bir bilgisayar yardımcı olabilir.
11. Şekil P30.11'de gösterilen gibi, yarıçapsal doğrular ve merkezleri P de olan çembersel yaylardan oluşan bir akım ilmeğini gözönüne alınız. P deki B manyetik alanının büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

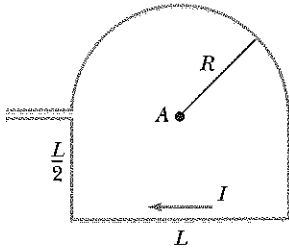


Şekil P30.11

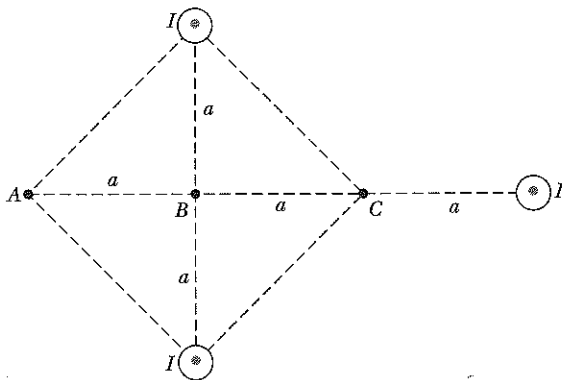
12. Şekil P30.12 de gösterilen akım ilmeğinin başlangıç noktasında oluşturduğu manyetik alanı I , a ve d cinsinden bulunuz.
13. Şekil P30.13 deki ilmek bir I akımı taşımaktadır. A noktasındaki manyetik alanı, I , R ve L cinsinden bulunuz.
14. Üç, uzun ve paralel iletken $I = 2,00$ şer Amper akım taşımaktadır. Şekil P30.14, her üç akım da kağıt düzleminde dışa doğru geldiği iletkenlerin uçtan görünüşüdür. Eğer $a = 1,00 \text{ cm}$ ise, A , B ve C noktasındaki manyetik alanların büyüklük ve yönlerini bulunuz.
15. Şekil 30.15 de görüldüğü gibi, iki uzun paralel iletken her ikisinde sağa düzleminin içine doğru yönel-



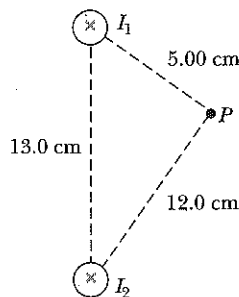
Şekil P30.12



Şekil P30.13



Şekil P30.14



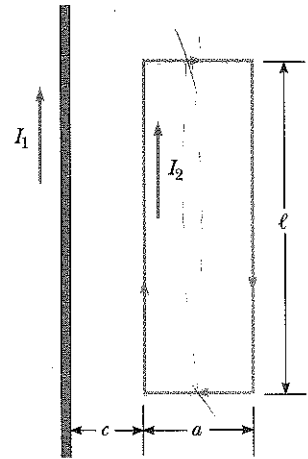
Şekil P30.15

miş $I_1 = 3,00$ A ve $I_2 = 3,00$ A akımları taşımaktadırlar. P'de oluşan net manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

Kesim 30.2 İki Paralel iletken Arasındaki Manyetik Kuvvet

16. Aralarında 10 cm uzaklık bulunan iki uzun paralel iletken aynı yönde akım geçmektedir. Birinci iletkenin geçen akım $I_1 = 5,00$ A, ikinciden geçen ise $I_2 = 8,00$ A'dır. (a) I_1 in I_2 nin bulunduğu yerde oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğü nedir? (b) I_1 in I_2 ye birim uzunluk başına etkiyen kuvvet nedir? (c) I_2 nin I_1 in bulunduğu yerde oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğü nedir? (d) I_2 nin I_1 e birim uzunluğu başına uyguladığı kuvvet nedir?

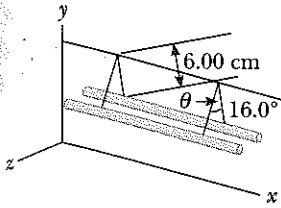
17. Şekil P30.17'deki düzenekte, uzun ve doğru iletkenlerden geçen akım $I_1 = 5$ A olup, $I_2 = 10$ A'lık akım taşıyan dikdörtgenel ilmeğin düzlemi içinde bulunmaktadır. Boyutlar $c = 0,10$ m, $a = 0,15$ m ve $\ell = 0,45$ m'dir. I_1 akımı taşıyan iletkenin oluşturduğu manyetik alanın ilmeğe uyguladığı net kuvvetin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.



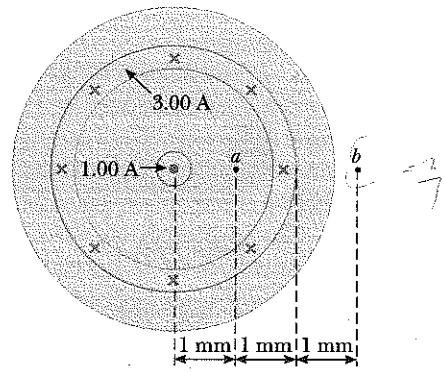
Şekil P30.17

18. Manyetik akının birimine Wilhelm Weber'in adı verildi. Manyetik alanın pratik büyüklüğünün birimine Johann Karl Friedrich Gauss'un adı verildi. Her ikisi de Göttingen'de (Almanya'da) bilim adamı idi. Bunlar bireysel becerilerinin yanı sıra 1833'te birlikte bir telgraf yapılar, 0,3 km uzunlukta bir iletim hattının bir ucuna yerleştirilen bir pil ile bir anabattardan oluşmuştu ve öteki uçtaki bir elektromıknatısı çalıştırmıştı. (Andre Ampère 1821'de elektriksel işaret göndermeyi önerdi; Samuel Morse 1844'de Baltimore ile Washington arasında bir telgraf hattı yaptı.) Weber ve Gauss'un iletim hattının Şekil P30.18'de diyagramlandığı gibi olduğunu varsayın. Birim uzunluğunun kütlesi 40 g/m olan iki uzun paralel tel, 6 cm uzunlukta iplerle yatay düzlemde asılı vaziyette tutulmaktadır. Her iki telde de aynı büyüklükte I akımı geçtiğinde, tellerin askı ipleri arasındaki θ açısı 16° olacak biçimde, bir

birlerini ittikleri görülmüştür. (a) Akımlar aynı yönde mi yoksa zıt yönlere midir? (b) Akımın büyüklüğünü bulunuz.



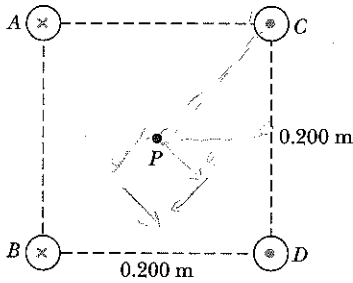
Şekil P30.18



Şekil P30.21

Kesim 30.3 Ampère Yasası

20. Dört uzun ve paralel iletkenin hepsinden de $I = 5A$ geçmektedir. İletkenlerin uçlarının görünüşü Şekil P30.19'da görülmektedir. A ve B noktalarında akımların yönü kağıt düzleminin içine (çarpılarla gösterilmiş), C ve D noktalarında ise kağıt düzleminin dışına (noktalarla gösterilmiş) doğrudur. Kenar uzunluğu 0,2 m olan karenin merkezinde bulunan P noktasındaki manyetik alanın büyüklüğünü ve yönünü hesaplayınız.



Şekil P30.19

ki uzun bir uzatma kablосundaki iki iletken zıt yönlere geçen 2,00 A lik akımlar taşımakta ve aralarındaki uzaklık 3,00 mm olsun. Doğru kablounun ortasından 40,0 cm uzaklıkta iki telin düzlemi üzerindeki bir noktada manyetik alanı bulunuz. (c) Hangi uzaklıkta onda birine düşer? (d) Bir ortak-eksenli kablounun iç telinden bir yönde 2,00 A lik bir akım geçerken dış telinden (kımından) buna zıt yönde 2,00 A lik bir akım geçtiğine göre kablounun dışındaki noktalarda oluşturduğu manyetik alan nedir?

23. Bir Tokamak füzyon reaktörünün manyetik alan kangalları, iç yarıçapı 0,7 m ve dış yarıçapı 1,3 m olan bir toroid biçimindedir. Toroidin kalın tellerden oluşan 900 sarımı varsa ve bunların herbirinden 14 kA geçiyorsa, toroidin (a) iç yarıçapı boyunca (b) dış yarıçapı boyunca manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

24. Yarıçapı 2,5 cm olan silindirik bir iletken boyunca $I = 2,5 A$ akım geçmektedir. Bu akım iletkenin kesitinin her tarafına düzgün olarak dağıldığına göre, (a) iletkenin yarıçapı boyunca yarı yoldaki (yani, $r = R/2$ deki) manyetik alanı bulunuz. (b) İletkenin yüzeyi dışında hangi uzaklıkta, manyetik alanın büyüklüğü, $r = R/2$ deki büyüklüğü ile aynı olur?

WEB 25. 100 adet uzun, düz ve yalıtılmış tellerden yarıçapı $R = 0,5 cm$ olan bir silindir oluşturulmuştur. (a) Her telden 2 A şiddetinde akım geçerse demetin merkezinden 0,2 cm uzaklıktaki bir telin birim uzunluğuna etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir? (b) Demetin dış kenarındaki bir tele (a) şıkında hesaplanan kuvvetten büyük bir kuvvet mi, yoksa küçük bir kuvvet mi etki edecektir?

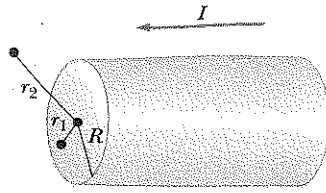
26. Niobiyum metali, 9 K nin altına kadar soğutulduğu zaman bir süperiletken olur. Yüzey manyetik alanı 0,1 T'yi geçtiğinde süperiletkenlik ortadan kalkıyorsa, bir dış alan yokken 2 mm çaplı bir niobiyum telin taşıyabileceği ve süperiletkenliğini koruyabileceği maksimum akımı bulunuz.

27. Yarıçapı R olan bir uzun, silindirik iletken, Şekil P30.27 de gösterilen gibi bir I akımı taşımaktadır. Ancak, akım yoğunluğu J , iletkenin kesitinde düz-

20. Bir yatay masa üzerinde duran uzun, doğrusal tel $1,20 \mu A$ lik bir akım taşımaktadır. Vakumdaki bir proton, akıma zıt yönde tele paralel olarak $2,30 \times 10^4 m/s$ lik bir sabit süratla telin d kadar üstünden geçtiğine göre d nin değerini bulunuz. Dünya'dan kaynaklanan manyetik alanı gözardı edebilirsiniz.

21. Şekil P30.21, bir koaksiyel (ortak-eksenli) kablounun kesit görünümüdür. Merkezdeki iletken bir lastik tabakayla çevrilmiş, bu da dış iletkenle çevrilmiş, dış iletken de bir başka lastik tabakayla çevrilmiş. Özel bir uygulamada, içteki iletkenin geçen akımı 1,00 A olup sayfa düzleminin dışı ve dıştakinden geçen akım ise 3,00 A olup sayfa düzleminin içine doğrudur. a ve b noktasındaki manyetik alanların büyüklük ve yönlerini bulunuz.

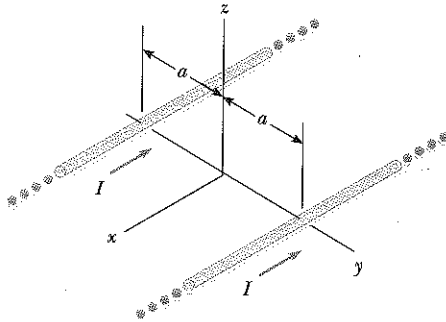
22. 2,00 A akım taşıyan uzun, doğrusal telden 40,0 cm uzaklıktaki manyetik alan $1,00 \mu T$ dir. (a) alan hangi uzaklıkta $0,1 \mu T$ olur? (b) Herhangi bir anda evde-



Şekil P30.27

gün olmayıp $J = br$ bağıntısına göre eksenenden uzaklığın bir fonksiyonudur. Burada b bir sabittir. Silindirin ekseninden (a) bir $r_1 < R$ uzaklıkta ve (b) bir $r_2 > R$ uzaklıkta B manyetik alanını veren ifadeleri bulunuz.

28. Şekil P30.28 de her iki akımın da negatif x yönünde olduğunu varsayınız. (a) yz -düzlemindeki manyetik alan desenini çiziniz. (b) z eksenini boyunca hangi d uzaklığında manyetik alan maksimumdur?



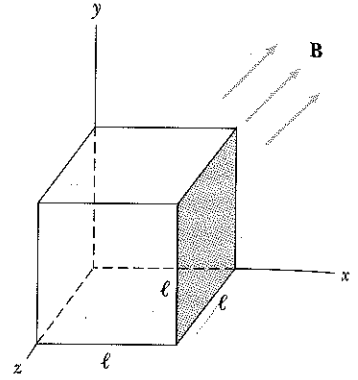
Şekil P30.28

Kesim 30.4 Bir Solenoidin Manyetik Alanı

29. 0,4 m uzunluğunda bir solenoidde (akım makarasında) düzgün sarılmış 1000 sarım bulunmaktadır. Bu uzun solenoidin merkezinde $1,0 \times 10^{-4}$ T büyüklüğünde bir manyetik alan oluşturabilmek için ne kadar akım gerekir?
30. 10 T'lık manyetik alan oluşturabilecek bir süperiletken solenoidin yapılması istenmektedir. (a) Solenoidin sarımı 2000 sarım/metre ise, ne kadar akım gerekmektedir? (b) Bu manyetik alan, solenoid sarımlarına, birim uzunluk başına ne kadar kuvvet etki ettirir?
31. Yarıçapı $R = 5,00$ cm olan bir solenoid, yarıçapı $r = 2,00$ mm, uzunluğu $\ell = 10,0$ m ($\ell \gg R$) ve öz direnci $\rho = 1,70 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ olan uzun bir telden yapılmıştır. Tel emk $\mathcal{E} = 20,0$ V olan bir üretece bağlanırsa, solenoidin merkezindeki manyetik alanı bulunuz.
32. Bir kenarının uzunluğu 2,00 cm olan bir sarımlı kare tel ilmekten saat yönünde 0,200 A'lık bir akım geçmektedir. İlmek, düzlemi solenoidin manyetik alanına dik olacak biçimde bir solenoidin içine yerleştiriliyor. Solenoidin birim uzunluğunda 30 sarım/m bulunmakta ve saat yönünde 15,0 A'lık bir akım taşımakta olsun. İlmeğin her kenarının gördüğü kuvveti ve ilmeğe etkiyen torku bulunuz.

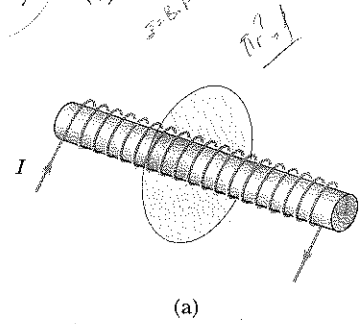
Kesim 30.5 Manyetik Akı

33. Kenar uzunluğu $\ell = 2,5$ cm olan bir küb, Şekil P30.33'te gösterildiği gibi, $\mathbf{B} = (5\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + 3\mathbf{k})$ T ifadesi ile verilen düzgün bir manyetik alan içine yerleştirilmiştir. (a) Kübün boyalı yüzünden geçen akıyı hesaplayınız. (b) Kübün altı yüzünden geçen toplam akı nedir?

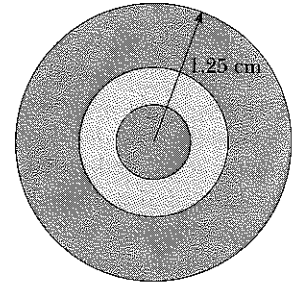


Şekil P30.33

34. Çapı 2,5 cm ve uzunluğu 30 cm olan bir solenoidin sarım sayısı 300 ve geçen akım 12 A'dır. Şekil P30.34a'da görüldüğü gibi merkezi solenoidin eksenine üzerinde olan ve bu eksene dik olarak yerleştirilen 5 cm yarıçaplı bir diskin yüzeyinden geçen akıyı hesaplayınız. (b)



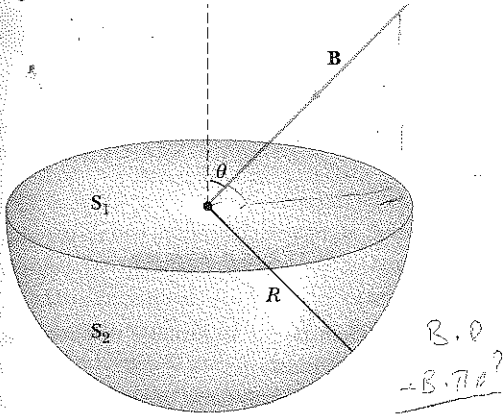
(a)



(b)

Şekil 30.34

Şekil P30.34b, aynı solenoidin büyütülmüş önden görünüşünü göstermektedir. İç yarıçapı 0,4 cm ve dış yarıçapı 0,8 cm olan ve mavi ile belirtilen bölgeden geçen akıyı hesaplayınız.



Şekil 30.35

35. Şekil P30.3 de görülen yarı-küresel kapalı yüzeyi veriliyor. Yarı-küre düşeyle θ açısı yapan bir düzgün manyetik alan içerisine konursa, (a) S_1 yatay yüzeyinden geçen ve (b) S_2 yarı-küresel yüzeyinden geçen manyetik akıyı bulunuz.

Kesim 30.6 Manyetizmada Gauss Yasası

Kesim 30.7 Yerdeğiştirme Akımı ve Ampère Yasasının Genel Biçimi

36. Şiddeti 0,2 A olan bir akım, yarıçapı 10 cm olan dairesel plakalı bir kondansatörü yüklemektedir. Plaka aralığı 4 mm ise, plakaların arasındaki bölgede (a) elektrik alanın artış hızı dE/dt ne kadardır? (b) merkezden itibaren 5 cm uzaklıkta manyetik alan ne kadardır?
37. Şiddeti 0,1 A olan bir akım, kenarı 5 cm olan kare plakalı kondansatörü yüklemektedir. Plaka aralığı 4 mm ise, (a) plakaların arasında elektrik akısının zamanla değişim hızı $d\Phi_E/dt$, (b) yerdeğiştirme akımı I_d ne kadardır?

(Seçmeli)

Kesim 30.8 Madde İçinde Manyetizma

38. Bohr'un 1913 model hidrojen atomunda elektron, yarıçapı $5,29 \times 10^{-11}$ m olan çember bir yörüngede $2,19 \times 10^6$ m/s süratle dolmaktadır. (a) Elektronun hareketinden kaynaklanan manyetik momentinin büyüklüğü nedir? (b) Elektron yatay bir çember üzerinde saatin dönme yönüyle ters yönde dolıyorsa bu manyetik moment vektörünün yönü nedir?
39. Ortalama yarıçapı 20 cm ve sarım sayısı 630 olan toroid şeklindeki bir sargı (Şekil P30.29'daki gibi) manyetik duymunluğu $\chi = 100$ olan çelik tozu ile doldurulmuştur. Sarımlardaki akım 3 A ise toroidin içindeki B 'yi (düzgün varsayın) bulunuz.
40. Demir-çekirdekli bir toroidde 1,3 T'lık bir manyetik alan oluşturulacaktır. Toroidin ortalama yarıçapı 10

cm ve manyetik geçirgenliği $5000 \mu_0$ dir. 470 sarımı varsa ne kadar akım gerekmektedir? Demir halkanın kalınlığı 10 cm'den azdır ve dolayısı ile madde içindeki alan hemen hemen düzgündür.

41. Ortalama yarıçapı 20 cm ve kesit alanı 8 cm^2 olan bir demir halkanın ($\mu_m = 750 \mu_0$) üzerinde 500 sarımı vardır. Akım 0,5 A olduğunda bu Rowland halkasındaki manyetik akı, Φ_B 'yi bulunuz.
42. Yarıçapı 2,00 cm ve üzerindeki toplam yük $6,00 \mu\text{C}$ olan bir düzgün halka, merkezinden geçen ve düzlemine dik olan bir eksen etrafında 4,00 rad/s lik sabit bir açısal hızla dönmektedir. Dönen bu halkanın manyetik momentini nedir?
43. Mıknatıslanması 880 kA/m ve manyetik alanı 4,4 T olan mıknatıslanmış bir madde için manyetik alan şiddeti H 'yi hesaplayınız.
44. Doyum halinde, demirdeki spinlerin sıralanışı toplam B manyetik alanına 2 T kadar katkıda bulunabilir. Her elektron $9,27 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ (1 Bohr magnetonu) değerinde bir manyetik moment katkısında bulunursa, demirin doyum manyetik alanına atom başına kaç tane elektron katkıda bulunur? (İpucu: m^3 de $8,5 \times 10^{28}$ demir atomu vardır).
45. (a) Curie yasasının şu şekilde söylenebileceğini gösteriniz: $\chi = C\mu_0/T$ bağıntısına göre, (burada C Curie sabitidir) bir paramanyetik maddenin manyetik duymunluğu mutlak sıcaklıkta ters orantılıdır. (b) Krom için Curie sabitini hesaplayınız.

(Seçmeli)

Kesim 30.9 Dünyanın Manyetik Alanı

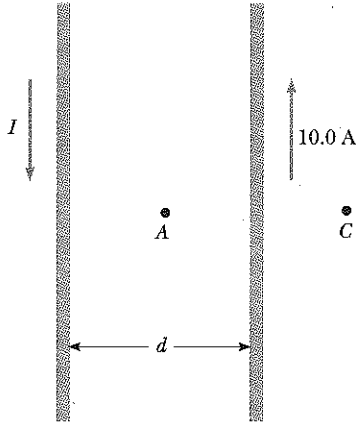
46. 30 cm çaplı ve 5 sarımlı çember şeklindeki bir kargal, eksenini dünyanın manyetik alanının yatay bileşenine dik olacak biçimde, dik bir düzlem içinde yöneltilmiştir. Kargalın merkezine yerleştirilen yatay bir pusula, kargala verilen 0,60 A şiddetinde bir akımla manyetik kuzeyden 45° saptırılıyor. (a) Dünyanın manyetik alanının yatay bileşeni ne kadardır? (b) Kargaldaki akım kesilsin. Düşey bir kuzey-güney düzleminde dönebilen bir pusula iğnesi, düşeyle 13° lik açı yaparsa, bu konumda dünyanın manyetik alanının toplam büyüklüğü ne kadardır?
47. Dünyanın manyetik momentini yaklaşık $8,0 \times 10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ dir. (a) Bu, kocaman bir demir yığınının maksimum ölçüde mıknatıslanmasından kaynaklansaydı, kaç tane çiftlenmemiş elketrona karşılık gelecekti? (b) Demir atomu başına 2 tane çiftlenmemiş elektron alsak, üstteki manyetik moment kaç kilogram demire karşılık gelecekti? (Demirin yoğunluğu 7900 kg/m^3 ve m^3 de yaklaşık $8,5 \times 10^{28}$ demir atomu bulunur.)

EK PROBLEMLER

48. Şimşek çakması, kısa bir zaman süresinde $1,00 \times 10^4$ A şiddetinde bir akım taşıyabilir. Yıldırımın düştüğü

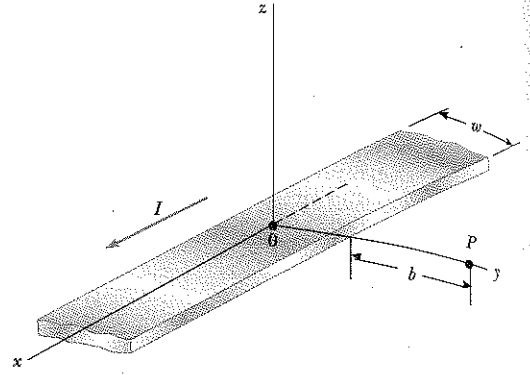
noktadan 100 m uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alan ne kadardır?

49. Dünya'nın manyetik alanının büyüklüğü her iki kutupta da yaklaşık $7,00 \times 10^{-5}$ T dir. Bu alanı ekvatorun çevresine yerleştirilen bir akım ilmeğinin oluşturduğunu varsaydığınız bir modeli kullanarak, böyle bir alanı oluşturabilecek olan akımın büyüklüğünü bulunuz. Bunu yaparken Dünya'nın içindeki manyetik maddelerin mıknatıslanmalarını dikkate almayın. (Dünya'nın yarıçapını $R_D = 6,37 \times 10^6$ m alın).
50. Şekil P30.50 de gösterildiği gibi iki paralel iletken zıt yönlerde akımlar taşımaktadırlar. İletkenin birinden geçen akım 10 A dir. A noktası teller arası uzaklığın orta noktası, C noktası ise 10-A akım taşıyan telin sağına doğru $d/2$ uzaklıktadır. $d = 18$ cm ve I , C noktasında manyetik alan sıfır olacak şekilde ayarlanmış ise, (a) I akımının değerini (b) A'daki manyetik alanın değerini bulunuz.



Şekil P30.50

51. Bir arabanın ön çamurluğunun ortasına bir pusula yerleştirdiğinizi varsayın. Farları açtığınız zaman onları besleyen akımın pusulayı koyduğunuz yerde oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğünü kabaca hesaplayınız. Bulduğunuz sonucu Dünya'nın manyetik alanı ile karşılaştırın. Arabanın çamurluğunun hemen hemen plastik olduğunu varsayabilirsiniz.
52. r telin ekseninden uzaklığı göstermek üzere $r \leq R$ için akım yoğunluğu $J(r) = J_0 (1 - r^2/R^2)$ ve $r > R$ için $J(r) = 0$ olan R yarıçaplı bir uzun, silindirik tel düşünün. (a) telin içindeki ($r \leq R$) ve dışındaki ($r > R$) manyetik alanı bulunuz. (b) Manyetik alanın büyüklüğünü r nin fonksiyonu olarak çizin. (c) Manyetik alanın maksimum olduğu konumu ve maksimum değerini bulunuz.
53. Genişliği w olan oldukça uzun ve ince bir metal şeritten Şekil P30.53'teki gibi uzunluğu boyunca bir I akımı geçmektedir. Şeritten b kadar uzaklıkta fakat



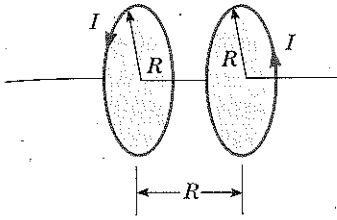
Şekil P30.53

- şerit düzlemindeki bulunan P noktasındaki manyetik alanı bulunuz.
54. Bir öğrenci bir araştırma projesi için, içinde 0,03 T büyüklüğünde bir manyetik alan oluşturabilen bir solenoide gereksinim duyar. Şiddeti 1,0 A olan bir akım ve çapı 0,50 mm olan bir tel kullanmaya karar verir. Çapı 1,0 cm ve uzunluğu 10,0 cm olan yalıtıkan bir kalıp üzerine tabakalar halinde sararak solenoidi oluşturur. Tel tabakaların sayısını ve kullanılan telin toplam uzunluğunu bulunuz.
55. İletken olmayan 10,0 cm yarıçaplı bir halka, $10,0 \mu\text{C}$ luk toplam pozitif yükle düzgünce yüklenmiştir. Bu halka, düzlemine dik olan ve merkezinden geçen bir eksen etrafında 20,0 rad/s'lik sabit bir açısal hızla dönmektedir. Halkanın merkezinden 5,00 cm uzaklıkta eksen üzerinde bir noktada oluşan manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.
56. İletken olmayan R yarıçaplı bir halka, toplam pozitif q yükü ile düzgün olarak yüklüdür. Bu halka, düzlemine dik olan ve merkezinden geçen bir eksen etrafında sabit bir ω açısal sürat ile dönmektedir. Halkanın eksen üzerinde merkezinden $R/2$ m uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alanın büyüklüğü nedir?

57. Ortak bir eksene dik olan R yarıçaplı çember şeklinde iki kangal alalım. Şekil P30.57'de gösterildiği gibi kangalların merkezleri arasındaki uzaklık R ve her iki kangaldan da aynı yönde birer kararlı I akımı geçmektedir. (a) Ortak eksen üzerinde kangallardan herhangi birinin merkezinden x uzaklıktaki bir noktada manyetik alanın,

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \left[\frac{1}{(R^2 + x^2)^{3/2}} + \frac{1}{(2R^2 + x^2 - 2Rx)^{3/2}} \right]$$

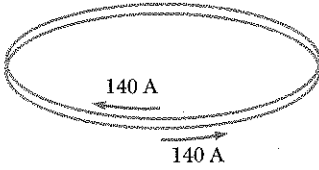
- olduğunu gösteriniz. (b) Kangalların arasındaki orta noktada dB/dx ve d^2B/dx^2 nin her ikisinin de sıfır olduğunu gösteriniz. Bu demektir ki kangalların arasında orta bölgedeki manyetik alan düzgündür. Bu şekillenimdeki kangallara **Helmholtz kangalları** (bobinleri) denir.
58. Herbirinin yarıçapı 0,50 m ve sarım sayısı 100 olan iki özdeş, yassı ve çember şeklinde tel kangal verilir.



Şekil P30.57 Problem 57 ve 58

yor. Bu kangallar, Helmholtz kangalaları takımı biçiminde paralel ve aralarındaki uzaklık 0,50 m olarak düzenlenirler (Şekil P30.57) ve her iki kangaldan da 10 A akım geçirilirse, kangalların eksenini üzerinde olmak şartıyla aralarındaki orta noktada manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

59. Ortak-eksenli paralel ve hemen hemen birbirine dokunmak üzere olan iki çember şeklindeki ilmekler arasında 1 mm uzaklık vardır (Şekil P30.59). Her bir ilmeğin yarıçapı 10 cm olup, üstteki saat yönünde 140 A'lık bir akım, alttaki ise saatin tersi yönünde yine 140 A'lık bir akım taşımaktadır. (a) Alttaki ilmeğin üsttekine uyguladığı manyetik kuvveti bulunuz. (b) Üstteki ilmeğin kütlesi 0,021 kg'dır. Üsttekine etkiyen kuvvetlerin (a) şıklındaki kuvvet ve ağırlığından ibaret olduğunu varsayarak ivmesini hesaplayınız.



Şekil P30.59

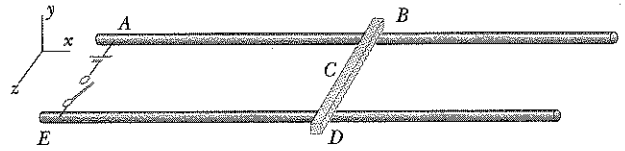
60. Bir elektrik alan içerisindeki hangi cisimlere kuvvet etki eder? Bu sorunun yanıtını Bölüm 23 verebilir: Alanı oluşturan yükün dışındaki hareketli ya da durgun herhangi bir elektrik yüküne bir elektrik alanı ne oluşturur? Bölüm 23 de tartışıldığı gibi durgun ya da hareketli herhangi bir yük oluşturabilir. Bir manyetik alan içerisindeki hangi cisimlere kuvvet etki eder? Bölüm 29 da ortaya konulduğu gibi alanı oluşturan akım ya da hareketli yükün dışında bir elektrik akımı ya da hareketli bir elektrik yüküne. Bir manyetik alanı ne oluşturur? Kesim 30.11 de bulunduğunuz gibi bir elektrik akımı ya da bu problemde olduğu gibi bir hareketli elektrik yükü oluşturur. Bir manyetik alanı bir hareketli yükün nasıl oluşturduğunu gösterebilmek için $\mathbf{v}$ hızı ile hareket eden bir q yükü alalım. Yükten herhangi bir konumu gösteren birim vektör $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/r$ olsun. Söz konusu konumdaki manyetik alanın

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

ile verildiğini gösterin. (b) $2,00 \times 10^7$ m/s süratla he-

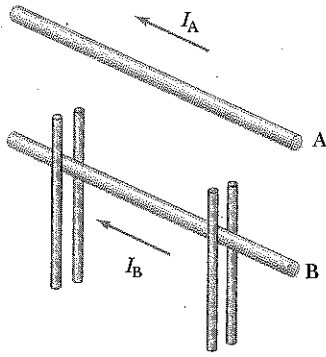
reket eden bir protonun yönüne dik 1,00 mm uzaklıktaki manyetik alanın büyüklüğünü bulun. (c) Bu noktada aynı süratla fakat zıt yönde gitmekte olan bir başka protona etkiyen manyetik kuvveti bulunuz. (d) İkinci protona etkiyen elektriksel kuvveti bulunuz.

61. Uzaya kimyasal roketsiz mermi gönderme ve savaş için yerden havaya savunma silahı olarak *ray tüfekleri* önerildi. *Ray tüfeğinin* masa-üstü bir moledi (Şekil P30.61), aralarındaki uzaklık 3,50 cm olan iki uzun paralel yatay rayla bunlar arasına kütlesi 3,00 g olan bir *BD* çubuğunun oluşturduğu köprüden oluşur. Çubuk başlangıçta rayların ortasında durmakta fakat sürtünmesiz olarak kayabilecek şekilde serbesttir. Anahtar kapatıldığında, *ABCDEA* devresinde çabucak bir elektrik akımı doğar. Raylar ve çubuğun elektriksel direnci oldukça azdır ve güç kanağı 24,0 A akım taşıyan oldukça uzun doğru bir telden 1,75 cm uzaklıktaki bir noktada oluşan manyetik alanın büyüklüğünü bulun. (b) (*İpucu:* Biot-Savart yasasından nasıl bir sonuç çıkarabileceğinizi düşünün) (c) *BD* çubuğu boyunca diğer noktalarda alan *C* deki ile aynı yönde fakat daha büyüktür. *BD* boyunca ortalama etkin alanın, *C* deki alanın 5 katı olduğunu varsayın. Bu varsayma göre çubuğa etkiyen vektörel kuvveti bulun. (e) çubuk sabit bir ivmeyle mi hareket eder? (f) çubuk rayların ucuna doğru 130 cm yol aldığı anda hızı ne olur?

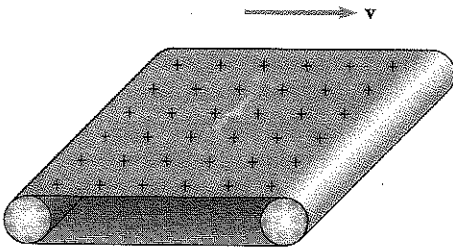


Şekil P30.61

62. İki uzun, paralel iletken Şekil P30.62 de görülen gibi aynı yönde akım taşımaktadır. A iletkeni, 150 A'lık bir akım taşımakta ve bulunduğu konumda sıkıca tutulmaktadır. B iletkeni, I_B akımını taşımakta ve A ya paralel olarak iki yalıtkan yönlendirici arasında aşağı ve yukarı serbestçe kayabilmektedir. B iletkeninin lineer yoğunluğu 0,10 g/cm ise dengeye ulaştığında iki iletken arasındaki uzaklık 2,5 cm olduğuna göre I_B akımının değeri nedir?
63. Şekil P30.63 deki gibi bir büyük yalıtkan kayışın üzerine soldaki milin üst hizasından yük püskürtülüyor. Kayış, gösterildiği gibi millerin arasında v süratı ile hareket ederken düzgün yüzeyce yük yoğunluğu, σ olan bir yük taşımaktadır. Yük sağdaki mil üzerinde bulunan bir silici ile alınıp uzaklaştırılıyor. Hareketli kayışın yüzeyinin hemen üstünde bir nokta alınız. (a) Bu noktadaki $\mathbf{B}$ manyetik alanının büyüklüğünü veren bir bağıntı bulunuz. (b) Eğer kayış pozitif yük-



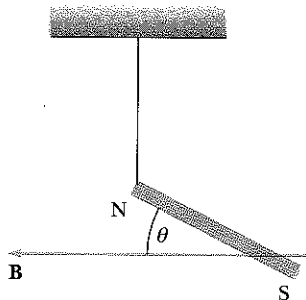
Şekil P30.62



Şekil P30.63

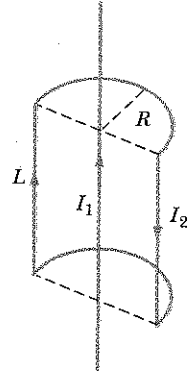
le yüklenmişse **B** nin yönü nedir? (Not: kayış sonsuz bir yaprak gibi düşünülebilir.)

64. Paramanyetik bir madde 4,0 K'lık bir sıcaklıkta tutulurken 5,0 T büyüklüğünde bir manyetik alan içine konulursa, doyum mıknatıslanmasının %10 una ulaştığı görülüyor. Numunedeki manyetik atomların yoğunluğunun 8×10^{27} atom/m³ ve atom başına manyetik momentin 5 Bohr magnetonu olduğunu varsayarak maddenin Curie sabitini bulunuz.
65. Bir çubuk mıknatıs (kütlesi = 39,4 g, manyetik moment = 7,65 J/T, uzunluğu = 10 cm) bir sicimle tavana asılıdır. Şekil P30.65 de gösterildiği gibi, düzgün bir dış manyetik alan yatay olarak uygulanınca mıknatıs yatayla θ açısı yapacak şekilde dengeye geliyor. $\theta = 5^\circ$ ise, uygulanan manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.



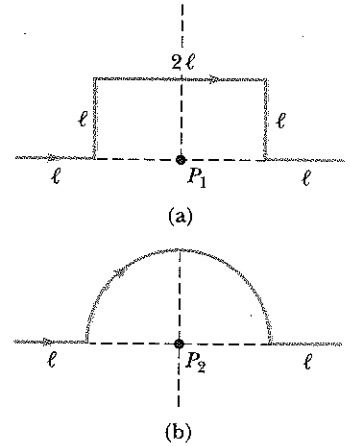
Şekil P30.65

66. Sonsuz uzunlukta doğrusal bir telden I_1 akımı geçmekte iken, Şekil P30.66 da gösterildiği gibi bir ilmekle kısmen çevrilmiştir. İlmek uzunluğu L , yarıçapı R ve I_2 akımı taşımaktadır. İlmek eksenine paralel olarak telin teldeki akımı bulunuz.



Şekil P30.66

67. Bir tel Şekil P30.67a da gösterilen biçimde bükülüyor ve teldeki akım I olduğu zaman P_1 'deki manyetik alan ölçülüyor. Aynı tel daha sonra, Şekil P30.67b'de gösterilen biçime sokuluyor ve akım yine I olduğunda P_2 deki manyetik alan ölçülüyor. Her iki durumda da telin toplam uzunluğu aynı ise, B_1/B_2 oranı nedir?



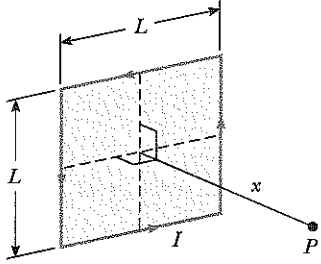
Şekil P30.67

68. 1962 yılında Oklahomada, Tusla Jeofizik gözleminde bir büyük hortumun manyetik alanı ölçülmüş. Hortum gözleminin 9,00 km doğusunda bulunduğu bir anda oluşturduğu manyetik alanın $B = 15,0$ nT büyüklüğünde ve kuzeye doğru yönelmiş olduğuna göre, bir uzun doğrusal tel olarak modellenebilen hortumdan yukarı ya da aşağı yönde akan akım ne kadardır?

69. Bir tel, kenar uzunluğu L olan kare şeklinde bükülmüştür. (Şek. P30.69). İlmekteki akım I olduğu zaman, eksenini üzerinde merkezinden x uzaklıkta olan bir P noktasındaki manyetik alanın

$$B = \frac{\mu_0 I L^2}{2\pi(x^2 + L^2/4)\sqrt{x^2 + L^2/2}}$$

ile verildiğini gösteriniz.

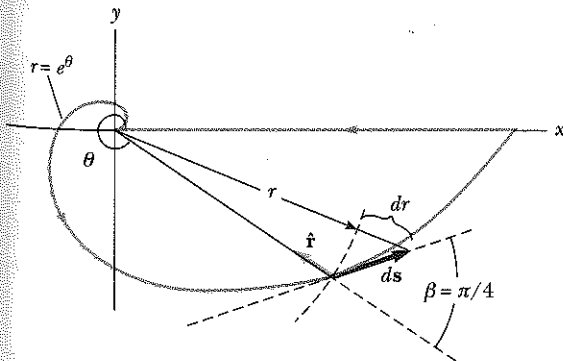


Şekil P30.69

70. x yönünde yönelmiş düzgün olmayan bir manyetik alanın yönelttiği bir μ manyetik dipolüne etkiyen kuvvet $F_x = |\mu| dB/dx$ ile verilir. Yarıçapları R olan iki yassı tel ilmeğin her ikisinden de I akımı geçtiğini varsayınız. (a) İlmekler ortak-eksenli olarak düzenlenmiş ve değişken bir x uzaklığı kadar ayırık iseler ($x > R$), aralarındaki manyetik kuvvetin $1/x^4$ biçiminde değiştiğini gösteriniz. (b) $I = 10$ A, $R = 0,5$ cm ve $x = 5,0$ cm ise bu kuvvetin büyüklüğünü bulunuz.

71. Üzerinden I akımı geçen bir tel Şekil P30.71'de görüldüğü gibi $\theta = 0$ ile $\theta = 2\pi$ aralığında değişen bir $r = e^\theta$ üstel spirali biçiminde bükülmüştür. Tam bir ilmek haline getirmek için spiralin uçları x eksenini üzerindeki doğru bir telle birleştirilmiştir. Başlangıç noktasında B 'nin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz. (İpucu: Biot-Savart yasasını kullanınız. $r = f(\theta)$ eğrisi üzerindeki herhangi bir noktaya giden yarıçapsal çizgi ile o noktadan geçen teğet çizgi arasındaki β açısı, fonksiyona aşağıdaki biçimde bağlıdır:

$$\tan \beta = \frac{r}{dr/d\theta}$$



Şekil P30.71

Bu durumda $r = e^\theta$ olduğundan $\tan \beta = 1$ ve $\beta = \pi/4$ dür. Bu nedenle ds ve $\hat{r}$ arasındaki açı $\pi - \beta = 3\pi/4$ olur. Ayrıca

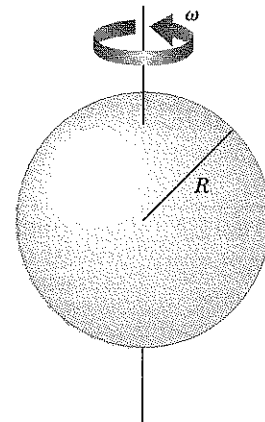
$$ds = \frac{dr}{\sin \pi/4} = \sqrt{2} dr$$

72. Tablo P30.72, bir ferromanyetik maddeden alınan verileri içermektedir. (a) Verilenden bir mıknatıslanma eğrisi elde edin. $B = B_0 + \mu_0 M$ olduğunu unutma. B ve B_0 çiftinin herbiri için B/B_0 oranını bulun ve B/B_0 'ın B_0 'a karşı değişim grafiğini çizin. (B/B_0 oranına bağlı geçirgenlik denir ve indüksiyonla oluşan manyetik alanın bir ölçüsüdür.

TABLO P30.72

$B(T)$	$B_0(T)$
0,2	$4,8 \times 10^{-5}$
0,4	$7,0 \times 10^{-5}$
0,6	$8,8 \times 10^{-5}$
0,8	$1,2 \times 10^{-4}$
1,0	$1,8 \times 10^{-4}$
1,2	$3,1 \times 10^{-4}$
1,4	$8,7 \times 10^{-4}$
1,6	$3,4 \times 10^{-3}$
1,8	$1,2 \times 10^{-1}$

73. Tarama Problemi. Yarıçapı R olan bir kürenin, hacimce yük yoğunluğu ρ sabittir. Kütle, merkezinden geçen bir eksen etrafında ω açısal hızı ile katı bir cisim gibi dönerse, merkezindeki manyetik alanı bulunuz (Şekil P30.73).

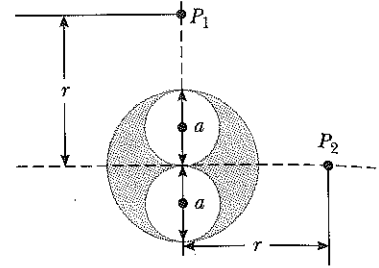


Şekil P30.73 Problem 73 ve 74

74. Tarama Problemi. Yarıçapı R olan bir kürenin hacimce yük yoğunluğu ρ sabittir. Küre, merkezinden

geçen bir eksen etrafında ω açısal hızı ile katı bir cisim gibi dönerse, manyetik dipol momentini bulunuz (Şekil P30.73 e bakınız).

75. Yarıçapı a olan bir uzun, silindirik biçimli iletken, Şekil P30.75 deki kesitten görüldüğü gibi, uzunluğu boyunca uzanan a çaplı iki silindirik deliğe sahiptir. Bir I akını, kağıt düzleminden dışa doğru yönelmiş ve iletkenin kesitine düzgün olarak dağılmıştır. (a) P_1 ve P_2 noktalarındaki manyetik alanların büyüklüklerini ve yönlerini μ_0 , I , r ve a cinsinden bulunuz.



Şekil P30.75

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 30.1 (c) $F_1 = F_2$; Newton'un üçüncü yasasından ötürü. Bu yanıtı ulaşmanın bir başka yolu da akımların çarpımının $(2A)(6A)$ veya $(6A)(2A)$ olmasının Eşitlik 30.11 in sonucunu değiştirmeyeceğini görmektir.
- 30.2 Birbirlerine yaklaşırlar; çünkü sarımlar birbirlerine paralel akım taşıyan teller gibi davranırlar ve bu yüzden birbirlerini çekerler.
- 30.3 b , d , a , c dir. Eşitlik 30.13, çizgi integralinin değerinin yalnız herbir kapalı ilmeğin çevirdiği bir yüzeyden geçen net akıma bağlı olduğunu belirtmektedir. b yolu 1A, d yolu 3A, a yolu 4A ve c yolu ise 6A lik birer net akımı sarmaktadır.
- 30.4 b , sonra $a = c = d$ dir. a , c ve d yolları sıfır olmayan aynı $\mu_0 I$ değerini verirler. Çünkü yolların büyüklükleri ve şekilleri önemli değildir. b yolu akımı içermektedir ve bu nedenle çizgi integrali sıfırdır.
- 30.5 Net kuvvet, evet; net tork hayır. İlmeğin üst ve alt kenarlarına etkiyen kuvvetlerin büyüklükleri eşit fakat yönleri zıt olduğundan birbirlerini etkisiz hale getirirler. İlmeğin sol kenarlarındaki akım I_1 e paralel olduğundan I_1 in bu kenara etki ettiği F_L kuvveti çekici, öte yandan sağ kenarındaki akım ise I_1 e paralel olduğundan I_1 in bu kenara etki ettiği F_R kuvveti iticidir. Sol taraf 1. tele daha yakın olduğundan $F_L > F_R$ ve net

kuvvet 1. tele doğrudur. İlmeğin dört kenarına etkiyen kuvvetlerin hepside ilmek düzleminde oldukları için net tork yoktur.

- 30.6 Sıfırdır; tam olarak yüklenmiş bir kondansatöre yük akmaz, bu nedenle plakalardaki yük değişmez ve plakalar arasındaki elektrik alan sabittir. Yerdeğiştirme akımının olması için elektrik alanının değişiyor olması gerekir.
- 30.7 (a) Biraz artar; (b) biraz azalır; (c) büyük ölçüde artar. Eşitlik 30.33 ve 30.34 e göre, metaller yerleştirilince toplam alan $\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H}$ olur. Tablo 30.2 ye göre alüminyum için $\mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H}$, $\mu_0 \mathbf{H}$ den biraz büyük, bakır için ise biraz küçüktür. Demir için, Örnek 30.10 da gördüğümüz gibi, alan binlerce kere kuvvetlendirilebilir.
- 30.8 İlmeği Şekil 30.31a dakine benzeyen maddeden daha iyi bir sürekli mıknatıs yapılabilir. Çünkü Şekil 30.31a da, Şekil 30.30 daki b noktasına karşılık gelen kalıcı mıknatıslanma daha büyüktür.
- 30.9 Batıdan doğuya doğru akmalıdır. Dünya'nın manyetik alan çizgileri gezegene Hudson Körfezinden girerler ve Antartika'dan çıkarlar. Bu nedenle akımdan kaynaklanan alan çizgileri zıt yönde gitmelidir. Şekil 30.6a ile Şekil 30.35 i karşılaştır.

Calvin ve Hobbes

Bill Watterson



HARİTALARIN NASIL HER ZAMAN YUKARIYI KUZAY, AŞAĞIYI GÜNEY GÖSTERDİKLERİNİ BİLİYOR MUSUNUZ? BUNUN DOĞRU OLUP OLMADIĞINI GÖRMEK İSTEDİM.

